



TUGAS AKHIR - MO141326

ANALISIS *TWISTING* DAN KEKUATAN *ULTIMATE* PADA *STRAPS PIGGYBACK PIPE*

LINTANG GHEA MAYOMI

NRP. 4311100083

Dosen Pembimbing :

Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D

Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

2015



FINAL PROJECT - MO141326

TWISTING AND ULTIMATE STRENGTH ANALYSIS OF PIGGYBACK PIPE STRAPS

LINTANG GHEA MAYOMI

NRP. 4311100083

Supervisors :

Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D.

Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

2015

ANALISIS *TWISTING* DAN KEKUATAN *ULTIMATE* PADA *STRAPS PIGGYBACK PIPE*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

LINTANG GHEA MAYOMI

NRP. 4311100083

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Yoyok Setyo Hadiwidodo ST., MT, Ph.D (Pembimbing 1)

2. Ir. Handayanu M.Sc., Ph.D (Pembimbing 2)



SURABAYA,

AGUSTUS 2015

ANALISIS *TWISTING* DAN KEKUATAN *ULTIMATE* PADA *STRAPS PIGGYBACK PIPE*

Nama Mahasiswa : Lintang Ghea Mayomi
NRP : 4311100083
Jurusan : Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Dosen Pembimbing : Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Piggyback pipe merupakan salah satu inovasi yang tercipta sebagai hasil perkembangan teknologi di sektor kemaritiman. Penggunaan *piggyback pipe* salah satunya adalah pada *field* yang berlokasi di 15 Km lepas pantai perairan timur laut India, yang menopangkan *umbilical cable* berdiameter 28 mm di atas pipa berdiameter 508 mm. Sebagai metode yang baru berkembang di bidang perpipaan bawah laut, banyak analisis yang dilakukan untuk meminimalisir kesalahan yang dapat terjadi pada sistem yang telah dioperasikan di lapangan. Salah satu aspek yang perlu didalami adalah analisis terhadap kegagalan sistem yaitu berupa *twisting* (putiran) ikatan *clamp* dan kegagalan *ultimate* material *straps*. Ikatan *clamp* sebagai titik vital sistem perlu dipastikan kekuatannya, material yang digunakan harus kuat dengan tegangan tali yang cukup untuk mempertahankan kedudukan *clamp*. Untuk mengetahui kekuatan material dan ketahanan ikatan sistem *piggyback pipe*, dilakukan analisis dengan menggunakan metode *incremental load* terhadap beban lingkungan yang mengenai struktur, sampai didapatkan nilai beban terbesar yang dapat ditahan oleh struktur. Analisis pada beban 1 tahun dan 100 tahun menunjukkan bahwa *clamp* tidak mengalami *twisting* dan material *straps* tidak mengalami kegagalan *ultimate*. Dari analisa *incremental load*, didapatkan bahwa kegagalan *twisting* pada ikatan *clamp* terjadi pada kecepatan arus 8.09 m/s atau sebesar 7.5 kali beban lingkungan ekstremnya, dengan beban hidrodinamik sebesar 447.37 N ke arah horizontal dan 372.83 N ke arah vertikal. Sedangkan kegagalan *ultimate* material *straps* terjadi pada kecepatan arus 60.61 m/s atau dengan beban hidrodinamik sebesar 152303.77 N ke arah horizontal dan 15297.02 N ke arah vertikal.

Kata Kunci : *Incremental Load*, Kegagalan *Ultimate*, *Piggyback pipe*, *Twisting*,

TWISTING AND ULTIMATE STRENGTH ANALYSIS OF PIGGYBACK PIPE STRAPS

Student Name : Lintang Ghea Mayomi
Reg. : 4311100083
Department : Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology Surabaya
Supervisors : Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Piggyback Pipe is an innovation created as a result of technological development in maritime sector. One of Piggyback Pipe usage is in field located 15 km offshore of the Northeast India Ocean, supporting 28 mm in diameter Umbilical Cable above 508 mm in diameter pipe. As a newly developed method in the field of subsea pipeline, many analysis needs to be done to minimize the fault that can be happen to the system that already operated in the field. One of aspect that needs to be deepened is the analysis of the system's failure, namely in the form of twisting in the clamp's bond and straps material's ultimate failure. Clamp's bond as a vital point of the system needs to be ensured about its strength. Material being used also has to be strong with sufficient strap tension to maintain clamp position. To know the strength of the material and the endurance of the Piggyback Pipe system's bond, incremental load analysis needs to be done to the environmental load on the structure, until largest load value that can be supported by the structure is obtained. Analysis to the load of 1 year and 100 year shows that clamp did not undergo twisting and straps material did not undergo ultimate failure. From the incremental load analysis, it was found that twisting failure on the clamp's bond occurs at the current speed of 8.09 m/s or 7.5 times its extreme environmental load, with hydrodynamic load of 447.37 N to the horizontal and 372.83 N to the vertical. Whereas straps material's ultimate failure occurs at the current speed of 60.61 m/s or with hydrodynamic load of 152303.77 N to the horizontal and 15297.02 N to the vertical.

Keywords : Incremental Load, Piggyback pipe, Twisting, Ultimate failure.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wa rahmatullahi wa barakatuh.

Subhanallah wal hamdulillah, puji syukur amat tinggi penulis panjatkan kehadiran Sang Pencipta, Allah SWT., atas ridho dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Tugas Akhir yang berjudul “Analisis *Twisting* dan Kekuatan *Ultimate* pada *Straps Piggyback Pipe*” ini merupakan sarana implementasi materi perkuliahan penulis yang disusun dalam bentuk laporan ilmiah sebagai salah satu syarat kelulusan untuk mendapatkan gelar Strata Satu (S1) di Jurusan Teknik Kelautan FTK ITS. Diharapkan tugas akhir ini dapat memberikan informasi kepada pembaca tentang metode *piggyback pipe* serta kemungkinan kegagalan yang dapat terjadi akibat beban lingkungan ekstrem.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi terwujudnya kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Akhir kata, penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat untuk pembaca dan masyarakat luas.

Wassalamu'alaikum wa rahmatullaahi wa barakaatuh.

Surabaya, Agustus 2015

Lintang Ghea Mayomi

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Pipa Bawah Laut	5
2.2 Piggyback <i>pipe</i>	5
2.3 Teori Tegangan	6
2.3.1 Dasar Teori Tegangan	6
2.3.2 Teori Gesekan dan Kontak Permukaan	9
2.3.3 Teori Momen	10
2.4 Beban Hidrodinamik	12
2.5 Puntiran (<i>Twisting</i>).....	18
2.6 Kekuatan <i>Ultimate Material</i>	19
2.7 Teori Kegagalan	22

2.8 Metode <i>Incremental</i>	24
2.9 Pengaruh Bidang di Dekat Silinder Terhadap Aliran Fluida	24
2.10 Metode Elemen Hingga (<i>Finite Elemen Method</i>)	27
2.10.1 Dasar Metode Elemen Hingga	27
2.10.2 Metode Elemen Hingga Dalam ANSYS	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Diagram Alir Pengerjaan	31
3.2 Prosedur Penelitian	32
3.2.1 Studi Literatur	32
3.2.2 Pengumpulan Data	32
3.2.3 Perhitungan Beban Lingkungan	36
3.2.4 Analisis dengan Komputasi Manual	37
3.2.5 Analisis dengan Pemodelan <i>Software</i>	39
3.2.6 Verifikasi Hasil	40
3.2.7 Pembahasan dan Penarikan Kesimpulan	40
BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Umum	41
4.2 Perhitungan Beban Lingkungan	42
4.3 Analisis dengan Komputasi Manual	43
4.3.1 Analisis <i>Twisting</i>	43
4.3.2 Analisis Kekuatan Ultimate	45
4.4 Analisis dengan Pemodelan <i>Software</i>	46
4.4.1 Model <i>Initial Condition</i>	48
4.4.2 <i>Mesh Sensitivity Analysis</i>	49
4.4.3 Pemodelan Sistem <i>Piggyback Pipe</i>	50
4.5 Perhitungan <i>Incremental Load</i>	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	57

DAFTAR PUSTAKA	59
-----------------------------	-----------

LAMPIRAN

- LAMPIRAN 1 : Perhitungan Beban Lingkungan
- LAMPIRAN 2 : Perhitungan Analisis *Twisting*
- LAMPIRAN 3 : Perhitungan Analisis Kekuatan *Ultimate*
- LAMPIRAN 4 : *Mesh Sensitivity Analysis*
- LAMPIRAN 5 : Hasil Pemodelan *software* ANSYS 14.5
- LAMPIRAN 6 : Perhitungan *Incremental Load*

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Cara pendistribusian minyak dan gas alam.....	1
Gambar 1.2	<i>Piggyback pipe</i>	2
Gambar 2.1	Komponen <i>piggyback pipe</i>	6
Gambar 2.2	Tegangan normal pada batang	7
Gambar 2.3	Tegangan geser pada balok.....	8
Gambar 2.4	Grafik <i>Region of Validity of Wave Theories</i>	14
Gambar 2.5	<i>Free Body Diagram</i> sistem <i>Piggyback pipe</i>	18
Gambar 2.6	Konfigurasi gaya pada <i>clamp</i>	19
Gambar 2.7	Kurva tegangan-regangan baja struktural	20
Gambar 2.8	Konfigurasi gaya lingkungan terhadap <i>straps</i>	21
Gambar 2.9	Perubahan <i>stagnation point</i> dan <i>separation point</i>	25
Gambar 2.10	Rekomendasi koefisien drag berdasarkan variasi <i>Reynold Number</i>	26
Gambar 2.11	Rekomendasi koefisien lift berdasarkan variasi <i>Reynold Number</i>	27
Gambar 2.12	Contoh gambar <i>solid elements</i> dengan <i>nodes</i>	28
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Metode Analisis.....	31
Gambar 3.2	Penampang samping <i>clamp</i> pada <i>piggyback pipe</i>	33
Gambar 3.3	Penampang depan <i>clamp</i> pada <i>piggyback pipe</i>	34
Gambar 3.4	<i>Flowchart</i> Perhitungan Beban Lingkungan	37
Gambar 3.5	<i>Flowchart</i> Analisis dengan Komputasi Manual	38
Gambar 3.6	<i>Flowchart</i> Analisis dengan Pemodelan <i>Software</i>	39
Gambar 4.1	Lokasi Operasi <i>Piggyback pipe</i>	41
Gambar 4.2	Konfigurasi Gaya pada <i>Clamp</i>	44
Gambar 4.3	Konfigurasi Gaya pada <i>Straps</i>	46
Gambar 4.4	Bentuk Geometri Model <i>Piggyback pipe</i>	47
Gambar 4.5	<i>Meshing</i> Model <i>Piggyback pipe</i>	47
Gambar 4.6	Model <i>Initial Condition</i>	48
Gambar 4.7	Hasil running <i>Initial Condition</i>	49
Gambar 4.8	Grafik hubungan jumlah elemen dengan tegangan	50

Gambar 4.9 Konfigurasi Gaya dan <i>Boundary Condition</i>	50
Gambar 4.10 Grafik Hubungan Tegangan dengan Deformasi	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rekomendasi faktor kekasaran seabed.....	16
Tabel 2.2	Rekomendasi Koefisien Hidrodinamik	17
Tabel 2.3	Zona Kedalaman Perairan	17
Tabel 3.1	Data Pipa	32
Tabel 3.2	Data <i>Coating</i>	33
Tabel 3.3	Data <i>Clamp</i>	34
Tabel 3.4	Data <i>Straps</i>	35
Tabel 3.5	Data <i>Umbilical Cable</i>	35
Tabel 3.6	Data Lingkungan	36
Tabel 4.1	Rangkuman hasil perhitungan beban lingkungan	42
Tabel 4.2	Rangkuman hasil perhitungan beban lingkungan	45
Tabel 4.3	Hasil analisa tegangan <i>straps</i> dengan komputasi manual	46
Tabel 4.4	Hasil <i>Mesh Sensitivity Analysis</i>	49
Tabel 4.5	Hasil pemodelan dengan software ANSYS 14.5	51
Tabel 4.6	Perhitungan <i>incremental load</i> untuk analisis <i>twisting</i>	53
Tabel 4.7	Perhitungan <i>incremental load</i> untuk analisis kekuatan <i>ultimate</i>	54
Tabel 4.8	Rangkuman Hasil Pemodelan ANSYS untuk beban lingkungan ter- <i>increment</i>	55

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR NOTASI

A	:	Luas penampang bidang, (m^2)
A_{straps}	:	Luas penampang <i>straps</i> , (m^2)
a	:	<i>Clamp gap</i> (m)
C_D	:	Koefisien drag
C_M	:	Koefisien massa
C_L	:	Koefisien lift
D	:	Diameter, (m)
d	:	Kedalaman perairan, (m)
F	:	Gaya normal, (N)
F_{env}	:	Kombinasi gaya hidrodinamik, (N)
F_{fric}	:	Gaya gesek, (N)
F_H	:	Gaya hidrodinamik arah horizontal, (N)
F_V	:	Gaya hidrodinamik arah vertikal, (N)
g	:	Gravitasi, (m/s^2)
H	:	Tinggi gelombang, (m)
I	:	Momen inersia, (kg.m^2)
k	:	Angka gelombang
L	:	Panjang awal struktur, (m)
L_{umb}	:	Panjang umbilical cable, (m)
m	:	Massa benda, (kg)
N	:	Gaya normal, (N)
OD_{pipe}	:	Diameter luar pipa, (m)
OD_{umb}	:	Diameter luar umbilical cable, (m)
r	:	Jari-jari, (m)
Re	:	<i>Reynold Number</i>
s	:	Jarak titik yang ditinjau dari dasar laut, (m)

SMTS	:	<i>Specified Maximum Tensile Stress</i> , (MPa)
T	:	Periode gelombang, (s)
T _{strap}	:	Gaya tegang <i>straps</i> , (N)
t _{strap}	:	Ketebalan <i>straps</i> (m)
U _c	:	Kecepatan arus pada <i>seabed</i> , (m/s)
U _e	:	Kecepatan partikel efektif total, (m/s)
U _o	:	Kecepatan partikel gelombang, (m/s ²)
U _p	:	Kecepatan partikel arus, (m/s)
U _r	:	Kecepatan efektif Arus (m/s)
U _w	:	kecepatan efektif gelombang, (m/s)
V	:	Gaya geser, (N)
v	:	Viskositas kinematis air laut, (m ² /s)
W _{straps}	:	Lebar <i>straps</i> (m)
Y	:	Jarak titik tangkap gaya hidrodinamik dari <i>center point</i> pipa, (m)
y _o	:	Ketinggian orbit partikel dari dasar laut, (m)
Z _o	:	Faktor kekasaran <i>seabed</i> , (m)
Z _r	:	Ketinggian arus di atas <i>seabed</i> , (m)
α	:	Sudut kemiringan <i>straps</i> (°)
ε	:	Regangan aksial (m/m)
ε'	:	Regangan radial (m/m)
μ	:	Koefisien gesek
ν	:	Perbandingan poisson
ρ	:	Berat jenis air laut (kg/m ³)
σ	:	Tegangan normal (Pa)
σ _e	:	Tegangan utama yang bekerja pada sumbu (Pa)
σ _x	:	Tegangan arah sumbu x (Pa)
σ _y	:	Tegangan arah sumbu y (Pa)
σ _z	:	Tegangan arah sumbu z (Pa)

σ_{xy}	:	Tegangan arah sumbu xy (Pa)
σ_{xz}	:	Tegangan arah sumbu xz (Pa)
σ_{yz}	:	Tegangan arah sumbu yz (Pa)
σ_{total}	:	Tegangan total <i>straps</i> (Pa)
σ_{straps}	:	Tegangan akibat gaya tegang <i>straps</i> (Pa)
σ_{env}	:	Tegangan akibat gaya hidrodinamik (Pa)
θ	:	Sudut fase
θ_{wave}	:	Sudut datang gelombang (°)
$\theta_{current}$:	Sudut datang arus (°)
τ	:	Momen gaya (N.m)
$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)$:	Percepatan partikel gelombang (m/s ²)

DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN 1 : Perhitungan Beban Lingkungan
- LAMPIRAN 2 : Perhitungan Analisis *Twisting*
- LAMPIRAN 3 : Perhitungan Analisis Kekuatan *Ultimate*
- LAMPIRAN 4 : *Mesh Sensitivity Analysis*
- LAMPIRAN 5 : Hasil Pemodelan *software* ANSYS 14.5
- LAMPIRAN 6 : Perhitungan *Incremental Load*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Pendistribusian hasil pengeboran berupa minyak mentah atau gas alam pada umumnya dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan pipa bawah laut (*subsea pipeline*) dan secara curah (misal : kapal, kargo) (Soegiono, 2007). Dewasa ini, penggunaan pipa bawah laut untuk pendistribusian minyak dan gas lebih diminati, dikarenakan tingkat keamanannya yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pendistribusian secara curah.



Gambar 1.1 Cara pendistribusian minyak dan gas alam.

(<http://subseaworldnews.com/>)

Seiring berkembangnya teknologi, banyak ditemukan inovasi metode yang diharapkan dapat menambah efektifitas kerja dalam kegiatan instalasi pipa bawah laut. Salah satunya adalah metode *Piggyback*. Metode *piggyback* atau penopangan adalah sebuah metode dimana dua pipa diinstall secara bersamaan dengan cara menopangkan pipa yang berdimensi lebih kecil (*secondary item*) pada pipa yang memiliki dimensi lebih besar (*primary item*). Penyatuan kedua buah pipa dilakukan dengan cara pemasangan *clamp* pada segmen-segmen tertentu.



Gambar 1.2 *Piggyback pipe* (www.lm-offshore.com)

Piggyback pertama kali digunakan tahun 1993 pada proyek North Morecambe di Laut Irish, India. Instalasi yang dilakukan adalah pipa berdiameter 36 inch dengan *umbilical cable* berdiameter 3 inch. Penggunaan *piggyback* sendiri dapat dilakukan untuk 2 buah pipa atau lebih, tergantung kebutuhan instalasinya.

Straps pada sistem *piggyback pipe* menjadi komponen yang sangat vital, dikarenakan peranannya yang sangat penting yaitu sebagai pengikat komponen-komponen dalam sistem. *Straps* terbuat dari logam dengan ketebalan tertentu yang diikatkan melingkar guna menyatukan *clamp* dengan *primary item*. Tegangan pada *straps* dibuat sedemikian rupa agar dapat mengikat *clamp* dengan kuat (tidak longgar).

Dalam sistem *piggyback pipe*, kondisi *clamp* yang hanya diikat mempunyai kemungkinan untuk mengalami pergeseran memutar (*twisting*) ketika dikenai gaya akibat arus dan gelombang. Pada kondisi yang lebih ekstrem, kombinasi gaya-gaya yang bekerja dapat menyebabkan tegangan pada *straps* melebihi kekuatan *ultimatenya*, sehingga menyebabkan *straps* mengalami kegagalan *ultimate*.

Untuk dapat mengetahui batas kekuatan material *strap*, dilakukan analisis kekuatan *ultimate* dengan penambahan beban secara bertahap dari beban lingkungan yang ada, metode analisis ini sering disebut dengan metode *incremental load*. Beban lingkungan yang terjadi pada lokasi analisis dimodifikasi dari nilai ekstremnya dengan penambahan bertahap, tujuannya adalah untuk mendapatkan kekuatan maksimum dan nilai beban terbesar yang dapat ditahan oleh material

straps. Dengan demikian, keamanan pada struktur *piggyback pipe* selama masa operasinya dapat diperkirakan.

Dalam tugas akhir ini, akan dibahas mengenai analisis *twisting* dan kekuatan *ultimate* pada *straps piggyback pipe* akibat beban lingkungan ekstrem. Analisis kekuatan *ultimate* dilakukan menggunakan metode *incremental load* sampai ditemukan nilai beban lingkungan terbesar yang menyebabkan *straps* mengalami kegagalan *ultimate*.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimanakah kondisi ikatan *clamp piggyback pipe* pada pembebanan lingkungan 1 tahunan dan 100 tahunan ?
2. Dengan menggunakan metode *incremental load* beban lingkungan, pada tahap peningkatan ke berapakah ikatan *clamp* akan mengalami *twisting*?
3. Dengan menggunakan metode *incremental load* beban lingkungan, pada tahap peningkatan ke berapakah *straps* mengalami kegagalan *ultimate*?

1.3. Tujuan

Dari perumusan masalah di atas, dapat diambil suatu tujuan dari penelitian yang dilakukan, yaitu:

1. Menganalisis kondisi ikatan *clamp* sistem *piggyback pipe* pada pembebanan lingkungan 1 tahunan dan 100 tahunan.
2. Menghitung pertambahan beban lingkungan sampai terjadi *twisting* pada ikatan *clamp* sistem *piggyback pipe*.
3. Menghitung pertambahan beban lingkungan sampai terjadi kegagalan *ultimate* pada *straps* sistem *piggyback pipe*.

1.4. Batasan Masalah

Pembatasan masalah dilakukan untuk menghindari pembahasan yang melebar. Batasan permasalahan yang diberlakukan adalah sebagai berikut :

1. Data *piggyback pipe* yang dianalisa diambil dari PT ZEE Indonesia yaitu proyek field yang berlokasi di 15 km lepas pantai perairan timur India.
2. *Clamp* dipasang dengan jarak 2 meter sepanjang pipa.
3. Profil dasar laut rata dengan kemiringan 0° .
4. Analisis dilakukan pada kondisi pipa meletak stabil diatas *seabed*.
5. Pemodelan menggunakan software ANSYS 14.5
6. Tidak dilakukan analisis lebih lanjut mengenai kerusakan komponen lain akibat kegagalan yang terjadi pada sistem.

1.5. Manfaat

Manfaat dari analisis yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah untuk mengetahui kemungkinan *twisting* pada ikatan *clamp* dan kekuatan *ultimate straps* pada suatu sistem *piggyback pipe* pada beban lingkungan ekstrem. Hasil penelitian nantinya diharapkan dapat menjadi acuan untuk menentukan tingkat keamanan sistem *piggyback* selama usia operasionalnya.

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Pipa Bawah Laut

Pipa bawah laut (*subsea pipeline*) adalah pipa yang berfungsi sebagai moda transportasi fluida (minyak, gas atau air) di daerah lepas pantai. Sebelum teknologi pipa berkembang, transportasi fluida banyak menggunakan kapal tanker, namun transportasi menggunakan kapal tanker ini memiliki resiko yang cukup besar seperti kecelakaan, cuaca buruk, dan sebagainya.

Pembangunan jaringan pipa untuk mengalirkan minyak mentah (*cruded oil*) di darat pertama kali dilakukan di Amerika Serikat pada tahun 1859, sedangkan penggunaannya untuk keperluan migas di bawah laut pertama kali dilakukan di Teluk Meksiko pada tahun 1940 (Guo, 2005). Di Indonesia sendiri, pemasangan pipa bawah laut pertama kali digunakan pada tahun 1975, yaitu untuk mengalirkan gas dari sumur Parigi (Laut Jawa) ke Cilamaya. (Soegiono, 2007).

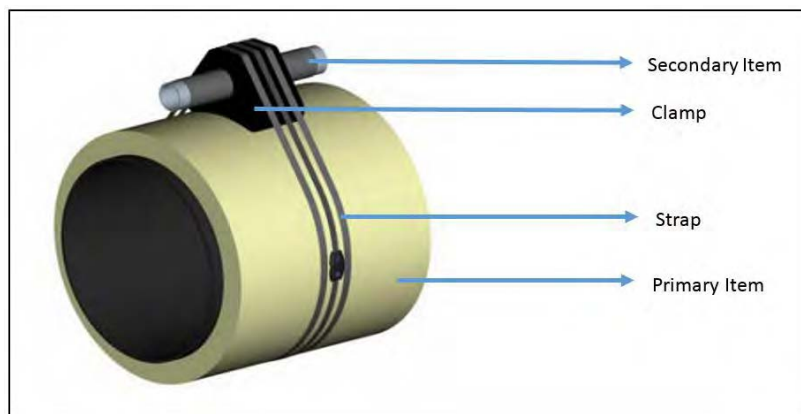
Dalam kondisi operasionalnya, pipa bawah laut dirancang untuk mampu menahan beban yang bekerja, baik beban dari dalam pipa (*internal loads*) maupun beban dari luar yaitu dari lingkungan sekitar (*eksternal load*). Kegagalan dalam sebuah sistem pipa biasanya terjadi akibat beban yang bekerja pada pipa melebihi batas aman kekuatan materialnya.

Secara umum, kegagalan yang terjadi pada *subsea structure* dibedakan menjadi dua jenis, yaitu kegagalan statis yang disebabkan oleh terjadinya beban tunggal yang melebihi tegangan *ultimate* material struktur, dan kegagalan dinamis yang disebabkan oleh *fatigue* struktur akibat beban siklis.

2.2. Piggyback pipe

Pengertian *piggyback* secara umum adalah suatu metode penopangan sebuah obyek pada obyek yang lain. Pada sistem perpipaan, *piggyback* lazim digunakan untuk item-item seperti pipa, umbilical, atau kabel. Suatu sistem *piggyback* terdiri dari empat buah komponen utama yaitu, *primary item*, *secondary item*, *clamp* dan *straps*. Pada umumnya, *primary item* dalam sistem *piggyback pipe*

memiliki dimensi yang lebih besar dibandingkan dengan *secondary item*-nya. *Clamp* merupakan sebuah *support* berbentuk seperti *saddle* yang berfungsi menopangkan *secondary item* pada *primary item*. *Straps* merupakan tali yang digunakan untuk mengikatkan *clamp* pada *primary item*. Dalam sebuah sistem *piggyback*, sebuah *primary item* dapat menopang lebih dari satu buah *secondary item*, tergantung pada tujuan dan keperluan dilakukannya *piggyback*.



Gambar 2.1 Komponen *piggyback pipe* (www.subseacableprotection.com)

Tujuan dari penggunaan *piggyback pipe* antara lain :

1. Menambah efisiensi kegiatan instalasi, dikarenakan penginstalan pipa/umbilical/kabel secara bersamaan lebih menghemat biaya dan waktu pengerjaan.
2. Penggunaan *piggyback* memungkinkan obyek-obyek kecil seperti *electrical cable* di install tanpa menggunakan pemberat, namun stabilitasnya tetap terjaga.

2.3. Teori Tegangan

2.3.1. Dasar teori tegangan

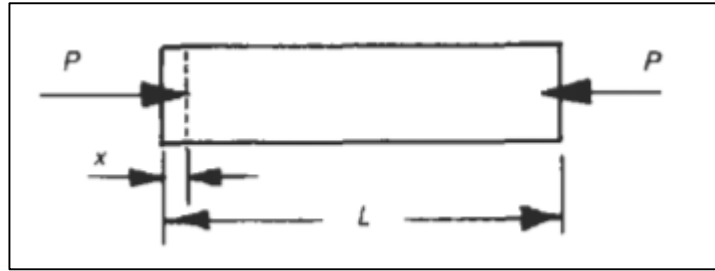
a. Tegangan normal

Tegangan normal adalah tegangan yang bekerja pada arah tegak lurus permukaan bidang, dapat berupa tegangan tarik (*tensile stress*) atau tegangan tekan (*compressive stress*). Tegangan normal dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

dengan,

- σ : Tegangan normal (Pa)
 F : Gaya normal (N)
 A : Luas penampang bidang (m²)



Gambar 2.2 Tegangan normal pada batang (Carvill, 1993)

Tegangan normal yang terjadi akibat suatu gaya yang bekerja pada benda dapat menyebabkan benda tersebut mengalami deformasi. Perbandingan antara deformasi benda dengan kondisi benda mula-mula disebut sebagai regangan. Regangan aksial adalah regangan yang terjadi akibat deformasi panjang, sedangkan regangan radial adalah regangan yang terjadi akibat deformasi luas penampang. Perbandingan antara regangan radial dan regangan aksial disebut dengan perbandingan poisson (*poisson's ratio*).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

- ε = regangan aksial
 ΔL = pertambahan panjang (m)
 L = panjang awal (m)

$$\varepsilon' = \frac{\Delta r^2}{r^2} \quad (3)$$

- ε' = regangan radial

Δr = pertambahan jari-jari (m)

r = jari-jari awal (m)

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (4)$$

ν = perbandingan poisson

ε' = regangan radial

ε = regangan aksial

b. Tegangan Geser

Tegangan geser (*shear stress*) adalah tegangan yang bekerja dalam arah tangensial terhadap permukaan benda.

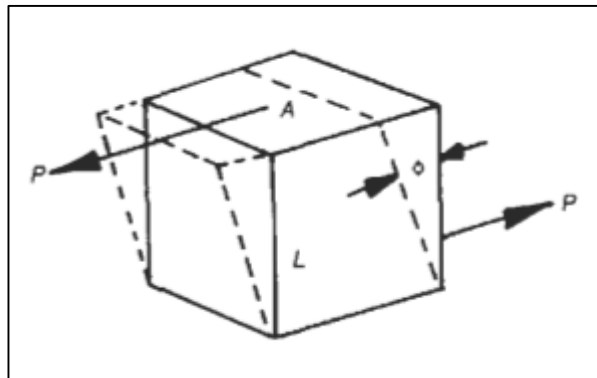
$$\tau = \frac{V}{A} \quad (5)$$

Dengan

τ = tegangan geser (Pa)

V = gaya geser (N)

A = luas permukaan benda (m²)



Gambar 2.3 Tegangan geser pada balok (Carvill, 1993)

Tegangan geser yang bekerja pada suatu benda disertai dengan regangan geser. Regangan geser tidak mempunyai kecenderungan mengubah dimensi benda, baik panjang maupun luas, namun menyebabkan perubahan bentuk elemen. Jika

mula-mula benda berbentuk kubus tegak, tegangan geser menyebabkan benda berdeformasi bentuk menjadi kubus miring.

c. Tegangan Von Mises

Pada elemen tiga dimensi, tegangan yang bekerja memiliki arah kerja yang tidak searah, pada umumnya diwakilkan dalam sumbu x, y dan z. Pada setiap sumbu dapat diketahui tegangan utama yang terjadi dari masing-masing komponen tegangan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

Penggabungan tegangan-tegangan utama yang bekerja pada suatu elemen merupakan suatu cara untuk mengetahui tegangan maksimum yang terjadi pada elemen tersebut. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan tegangan von mises sebagai berikut (Roney, 2014) :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (7)$$

dengan,

σ = Tegangan utama yang bekerja pada sumbu (Pa)

σ_x = Tegangan arah sumbu x (Pa)

σ_y = Tegangan arah sumbu y (Pa)

σ_z = Tegangan arah sumbu z (Pa)

σ_{xy} = Tegangan arah sumbu xy (Pa)

σ_{xz} = Tegangan arah sumbu xz (Pa)

σ_{yz} = Tegangan arah sumbu yz (Pa)

2.3.2. Teori Gesekan dan Kontak Permukaan

a. Kontak Permukaan

Suatu sistem yang terdiri lebih dari satu buah komponen memiliki keterkaitan antar komponen penyusunnya. Keterkaitan tersebut memungkinkan dua

buah komponen atau lebih mengalami interaksi berupa kontak permukaan. Dua benda yang berinteraksi pada permukaannya mengalami sebuah gaya gesek, yaitu gaya yang disebabkan oleh sentuhan antara material satu dengan material yang lain. Besarnya pengaruh gaya terhadap gesekan yang terjadi antar-material dinyatakan dalam sebuah koefisien yang disebut koefisien gesek (μ).

b. Gaya Gesek

Gaya gesek adalah gaya yang berarah melawan gerak benda atau arah kecenderungan benda akan bergerak. Gaya gesek muncul apabila dua buah benda bersentuhan dan salah satu atau keduanya mengalami gaya yang menyebabkan kecenderungan untuk bergerak.

Nilai kekasaran permukaan material secara langsung mempengaruhi besarnya gaya gesek yang terjadi. Semakin kasar permukaan material, maka gaya gesek yang terjadi semakin besar. Persamaan untuk gaya gesek adalah sebagai berikut :

$$V = N \times \mu \quad (8)$$

dengan,

$$\begin{aligned} V &= \text{Gaya Gesek (N)} \\ N &= \text{Gaya Normal (N)} \\ \mu &= \text{koefisien gesek} \end{aligned}$$

Ada dua jenis gaya gesek, yaitu gaya gesek statis dan gaya gesek kinetis. Gaya gesekan statis bekerja saat benda dalam keadaan diam dan nilainya mulai dari nol sampai suatu harga maksimum. Jika gaya yang bekerja pada suatu benda lebih kecil dari gaya gesekan statis maksimum, maka benda masih dalam keadaan diam. Sedangkan Gaya gesekan kinetis yaitu gaya gesekan yang bekerja pada benda ketika benda sudah bergerak

2.3.3. Teori Momen

Momen adalah kecenderungan sebuah gaya untuk memutar suatu obyek di sekitar sumbu tertentu dari benda tersebut. Momen didefinisikan sebagai perkalian antara besarnya sebuah gaya dengan jarak titik tangkap gaya terhadap obyek. Salah

satu syarat kesetimbangan benda selain jumlah gaya-gaya yang bekerja pada benda tersebut adalah nol, sigma dari momen gaya-gaya yang bereaksi pada benda dihitung terhadap suatu sumbu juga harus nol.

a. Momen Gaya

Pada gerakan rotasi, sebuah benda hanya dapat berubah gerakannya dari diam menjadi berputar jika pada benda itu diterapkan sebuah gaya. Perubahan gerak pada gerakan rotasi berupa perubahan kecepatan sudut. Perubahan gerak rotasi terjadi karena adanya gaya pemutar yang disebut dengan momen gaya (torsi). Besar momen gaya didefinisikan sebagai hasil kali gaya dengan lengan gaya.

$$\tau = F \times y \quad (9)$$

dengan,

- τ = Momen gaya (N.m)
- F = Gaya normal (N)
- r = Titik tangkap gaya (m)

b. Momen inersia

Momen inersia adalah ukuran kelembaman suatu benda untuk berotasi terhadap porosnya. Hukum Newton menyatakan bahwa ukuran kelembaman benda pada gerak translasi adalah massa atau inersia linier. Dalam gerak rotasi, massa benda tegar dikenal dengan istilah momen inersia. Momen inersia dalam gerak rotasi menyatakan ukuran kemampuan benda untuk mempertahankan kecepatan sudut. Semakin besar nilai momen inersia yang dimiliki suatu benda, maka benda tersebut akan cenderung diam dan makin sulit mengalami putaran. Momen inersia dinyatakan dalam formula berikut :

$$I = m r^2 \quad (10)$$

dengan,

- I = Momen inersia (kg.m²)
- m = massa benda (kg)
- r = jari-jari (m²)

2.4. Beban Hidrodinamik

Beban hidrodinamik bekerja pada stuktur bawah laut akibat beban lingkungan yang terjadi pada lokasi instalasi. Beban tersebut terdistribusi secara merata sepanjang bentangan pipa. Secara umum, beban hidrodinamik terdiri dari 3 buah gaya, yaitu gaya drag dan gaya inersia yang bekerja pada arah horizontal, serta gaya lift yang bekerja pada arah vertikal.

a. Gaya seret (*drag force*) adalah gaya mekanik yang dihasilkan oleh interaksi antara fluida dengan suatu permukaan benda padat. Persamaan untuk gaya seret adalah sebagai berikut (Bai, 2001) :

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_e^2 \cdot D \cdot C_D \quad (11)$$

dengan,

ρ	=	berat jenis air laut (kg/m^3)
U_e	=	Kecepatan partikel efektif (m/s)
C_D	=	Koefisien drag
D	=	Diameter (m)

b. Gaya inersia (*inertia force*) adalah gaya yang terjadi pada stuktur pipa akibat perpindahan masa air yang disebabkan oleh keberadaan pipa. Gaya inersia dinyatakan dalam persamaan berikut (Bai, 2001):

$$F_I = \rho \cdot C_M \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (12)$$

dengan,

ρ	=	berat jenis air laut (kg/m^3)
$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)$	=	Kecepatan partikel efektif (m/s^2)
C_M	=	Koefisien massa
D	=	Diameter (m)

c. Gaya angkat (*lift force*) adalah gaya hidrodinamik dalam arah vertikal, gaya ini terjadi apabila terdapat konsentrasi streamline pada pipa. Konsentrasi streamline terjadi di atas silinder pipa yang mengakibatkan gaya angkat ke atas. Jika terjadi celah sempit antara silinder dan *seabed*, konsentrasi streamline di bawah silinder

pipa akan mengakibatkan gaya angkat negatif ke arah bawah. Persamaan untuk gaya seret adalah sebagai berikut (Bai, 2001) :

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_e^2 \cdot D \cdot C_L \quad (13)$$

dengan,

ρ	=	berat jenis air laut (kg/m ³)
U_e	=	Kecepatan partikel efektif (m/s)
C_L	=	Koefisien lift
D	=	Diameter (m)

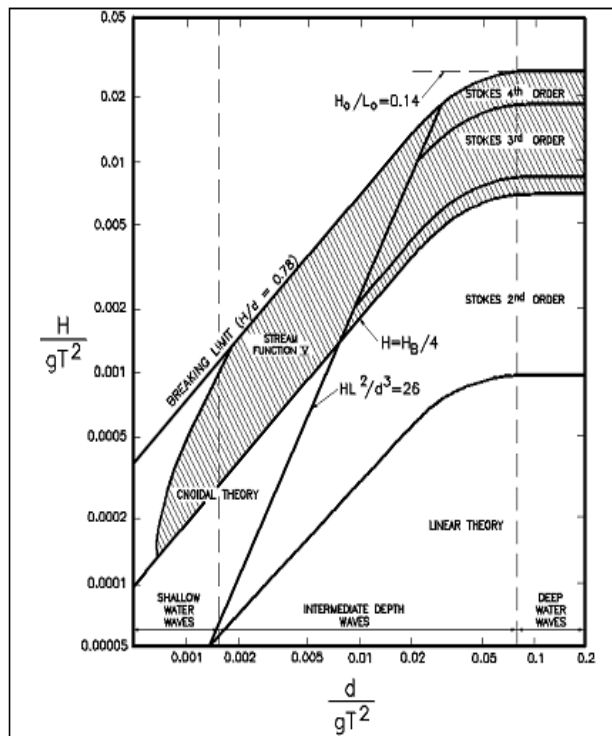
Besarnya koefisien drag, koefisien masa dan koefisien lift ditentukan oleh *Reynold Number* yang merupakan angka parameter bentuk aliran. *Reynold Number* dihitung berdasarkan kecepatan efektif aliran yang merupakan hasil menjumlahkan kecepatan gelombang efektif (U_w) dan kecepatan arus efektif (U_c). Besarnya kecepatan gelombang efektif dihitung dengan persamaan kecepatan gelombang sesuai teori gelombang yang berlaku. Penentuan teori gelombang menggunakan diagram *Region of Validity* dengan parameter sebagai berikut (Mouselli, 1981) :

$$\left[\frac{H}{gT^2} \right] \text{ dan } \left[\frac{d}{gT^2} \right] \quad (14)$$

dengan,

H	:	Tinggi gelombang (m)
T	:	Periode gelombang (s)
d	:	kedalaman perairan (m)
g	:	gravitasi (m/s ²)

Hasil perhitungan kedua parameter pada persamaan 14 berguna untuk menentukan teori gelombang dengan memakai grafik *Regions of Validity of Wave Theories*. Grafik *Regions of Validity of Wave Theories* dapat dilihat pada gambar seperti yang tertera di bawah ini :



Gambar 2.4 Grafik *Region of Validity of Wave Theories* (Mouselli, 1981)

Dari grafik tersebut, didapatkan teori gelombang yang berlaku dalam analisis. Setiap teori gelombang memiliki turunan persamaan tersendiri dalam menghitung nilai kecepatan gelombang efektif.

Kebanyakan perhitungan teori gelombang pada perairan tertutup Benua Asia menggunakan teori gelombang *Stoke*. Teori gelombang *stoke* merupakan solusi untuk perairan yang membutuhkan tingkat akurasi lebih tinggi dari teori gelombang linier. *Stoke* memasukkan ekspresi deret kecepatan potensial dalam persamaan *Laplace* dan syarat batas dasar laut (Febrian, 2012). Persamaan kecepatan horizontal partikel air yang digunakan pada teori *stoke* orde dua dapat diketahui dari persamaan berikut :

$$U_o = \frac{\pi H \cosh ks}{T \sinh kd} \cdot \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd} \cdot \cos 2\theta \quad (15)$$

dengan :

U_o = kecepatan horizontal partikel air, (m/s)

k = angka gelombang = $2\pi/\lambda$

L = panjang gelombang, (m)

s = jarak vertikal titik yang ditinjau dari dasar laut, (m)

θ = sudut fase = $kx - \omega t$

dengan :

x = jarak horizontal titik yang ditinjau, (m)

ω = frekuensi gelombang, (rad/s) = $2\pi / T$

t = waktu yang ditempuh untuk mencapai jarak horizontal titik yang ditinjau, (s)

Persamaan kecepatan horizontal partikel jika diturunkan akan menjadi percepatan horizontal partikel ($\frac{\partial u}{\partial t}$) dimana persamaannya dapat dilihat pada rumus berikut ini :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H \cosh ks}{T \sinh kd} \cdot \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cdot \sin 2\theta \quad (16)$$

Kecepatan partikel gelombang pada kedalaman tertentu dapat dihitung menggunakan persamaan *Mouselli* (1981) seperti berikut :

$$U_w^2 = 0,778 \cdot U_o^2 \cdot \left(\frac{D}{y_o} \right)^{0.286} \quad (17)$$

dengan:

U_w = kecepatan efektif gelombang (m/s)

U_o = kecepatan partikel gelombang, (m/s)

y_o = ketinggian orbit partikel dari dasar laut, (m)

Untuk menghitung kecepatan efektif arus digunakan dengan persamaan berikut (DnV, 2012) :

$$U_r = U_p \cdot \frac{\left(1 + \frac{Z_o}{D} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{D}{Z_o} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_o} + 1 \right)} \cdot \sin(\theta_{curr}) \quad (18)$$

dengan :

U_r = kecepatan arus efektif, (m/s)

Z_o = faktor kekasaran seabed, (m)

Z_r = ketinggian arus di atas seabed, (m)

D = Diameter (m)

Rekomendasi nilai faktor kekasaran *seabed* menurut DnV (2012) tercantum pada tabel berikut :

Tabel 2.1 Rekomendasi faktor kekasaran seabed

Table 3-1 Seabed roughness		
<i>Seabed</i>	<i>Grain size d_{50} [mm]</i>	<i>Roughness z_0 [m]</i>
Silt and clay	0.0625	$= 5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	0.25	$= 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	0.5	$= 4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	1.0	$= 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	4.0	$= 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	25	$= 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	125	$= 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	500	$= 4 \cdot 10^{-2}$

Kecepatan partikel arus didapatkan berdasarkan Dalil 1/7 menggunakan persamaan berikut (Mouselli, 1981) :

$$\frac{U_p}{U_c} = \left(\frac{d-s}{s} \right)^{1/7} \quad (19)$$

dengan :

- U_p : Kecepatan partikel arus, (m/s)
- U_c : Kecepatan arus pada seabed, (m/s)
- d : Kedalaman perairan, (m)
- s : Jarak titik yang ditinjau dari dasar laut (m)

Setelah mendapatkan nilai dari kecepatan partikel gelombang efektif dan kecepatan partikel arus efektif, maka untuk menghitung kecepatan efektif total (U_e) adalah dengan me-resultan kedua kecepatan tersebut.

$$U_e = U_w + U_r \quad (20)$$

Reynolds number (R_e) adalah parameter yang digunakan untuk menemukan koefisien hidrodinamik yang digunakan dalam perhitungan gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada pipa bawah laut. Persamaan untuk menentukan *Reynold Number* adalah (Mouselli, 1981) :

$$(21)$$

$$Re = \frac{U_e D}{\nu}$$

Dengan,

- Re : *Reynold Number*
 U_e : Kecepatan efektif partikel (m/s)
 D : Diameter (m)
 ν : Viskositas kinematis air laut (m²/s)

Penentuan koefisien hidrodinamik dapat dilihat dalam tabel berikut :

Tabel 2.2 Rekomendasi Koefisien Hidrodinamik

<i>Reynolds number</i>	Koefisien Hidrodinamik		
	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < Re < 1.0 \times 10^5$	1.6	1.0	2.0
$1.0 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{Re}{3 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$	2.0
$2.5 \times 10^5 < Re < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$
$Re > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

(sumber : Mouselli, 1981)

Pengkombinasian kecepatan arus dan kecepatan gelombang dipengaruhi oleh zona kedalaman perairan lokasi operasi struktur. Pembagian zona kedalaman perairan berdasarkan panjang gelombang dan kedalaman laut, tercantum pada tabel berikut (Indiyono, 2010) :

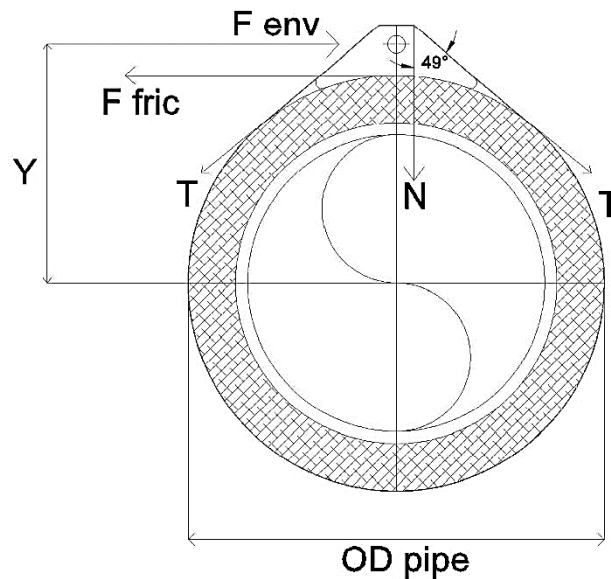
Tabel 2.3 Zona Kedalaman Perairan

Zona Kedalaman	Kriteria
Deep Water	$d/\lambda > 0.5$
Intermediet	$0.5 > d/\lambda > 0.05$
Shallow Water	$d/\lambda < 0.05$

2.5. Puntiran (*Twisting*)

Puntiran atau yang lebih sering disebut dengan *twisting* adalah sebuah kondisi dimana *clamp* sebagai tumpuan *piggyback pipe* bergeser dari posisi awalnya akibat terkena beban eksternal. Secara umum *twisting* terjadi pada sistem yang ikatan *straps*nya kurang kuat, sehingga tidak mampu menahan geseran yang terjadi akibat gaya dari luar sistem.

Berikut adalah *free body diagram* yang dapat menjelaskan peristiwa *twisting* yang terjadi pada sistem *piggyback pipe* :



Gambar 2.5 *Free Body Diagram* sistem *Piggyback pipe* (Dokumen proyek PT. ZEE Indonesia, 2012)

Sistem dikatakan pada kondisi setimbang jika gaya gesek yang terjadi antara permukaan *clamp* dengan permukaan pipa mampu mempertahankan posisi *clamp* yang terkena gaya hidrodinamik akibat beban lingkungan. Gaya geser tersebut dipengaruhi oleh besarnya tegangan yang diberikan oleh tali pengikat (*straps*).

Twisting terjadi jika nilai gaya eksternal yang mengenai sistem melebihi gaya gesek yang menahan *clamp*, sehingga *clamp* bergeser dari posisi awalnya.

Kriteria *twisting* dirumuskan dalam persamaan berikut :

$$F_H \times Y \leq F_{fric} \times \frac{1}{2} OD_{tot} \quad (22)$$

dengan,

- F_H : Gaya hidrodinamik arah horizontal (N)
- Y : Titik tangkap gaya ditinjau dari center point pipa (m)
- F_{fric} : Gaya gesek (N)
- OD : Diameter Luar (m)
- μ : Koefisien friction permukaan *clamp*

$$F_H = (F_D + F_I) \times L \quad (23)$$

$$F_{fric} = (N - F_L \times L) \times \mu \quad (24)$$

$$N = 2 \times T_{strap} \cos \alpha \quad (25)$$

dengan,

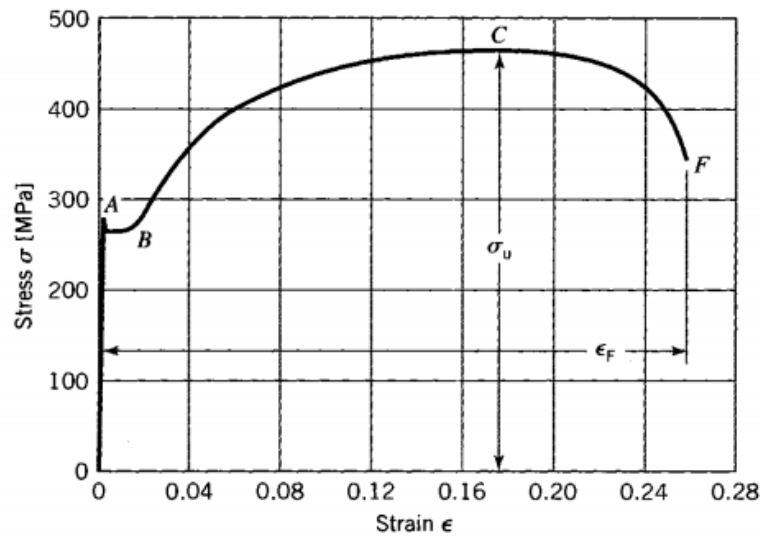
- N : Gaya Normal (N)
- T_{strap} : Gaya tegang *straps* (N)
- F_D : Gaya drag (N/m)
- F_I : Gaya inersia (N/m)
- F_L : Gaya lift (N/m)
- α : Sudut kemiringan tali (°)
- L_{umb} : Panjang umbilical cable (m)

2.6. Kekuatan *Ultimate Material*

Ultimate limit state (ULS) adalah sebuah kriteria pengukuran yang realistis dari kekuatan struktur dan sistem, karena menunjukkan kapasitas maksimum untuk menerima beban (Paik dkk, 2003). *ULS* merupakan syarat kekuatan material untuk menahan gaya-gaya yang bekerja terhadap kegagalan atau analisis mekanika teknik secara statis.

Bila suatu struktur yang terbuat dari baja lunak ditarik oleh gaya aksial tertentu pada kondisi temperatur ruang, maka respon struktur baja tersebut dapat

digambarkan pada suatu diagram yang menyatakan hubungan tegangan dan regangan, sebagai berikut :



Gambar 2.7 Kurva tegangan-regangan baja struktural (Boresi and Schmidt, 2003)

Daerah OA merupakan garis lurus yang merupakan daerah linier elastis. Kemiringan garis tersebut menyatakan besarnya modulus elastisitas atau yang biasa juga dikenal dengan *Modulus Young*. Titik A merupakan titik luluh atas (*upper yield point*), sedangkan titik B merupakan titik luluh atas (*lower yield point*). Daerah BC merupakan daerah platis dimana material meregang dan sudah kehilangan keelastisitasannya, regangan material tidak dapat kembali ke ukuran semula. Pada titik C, tegangannya mencapai nilai maksimum atau dengan kata lain merupakan tegangan tarik *ultimate* (*Ultimate Tensile Strength*). Dan pada titik F, material mengalami regangan maksimal, selanjutnya akan mengalami kegagalan (*failure*).

Analisis batas tegangan *ultimate* pada *straps piggyback pipe* merupakan analisis yang dilakukan untuk mengetahui batas tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh material *straps piggyback pipe*. Analisis kekuatan *ultimate* menggunakan metode *incremental load*, yaitu dengan menaikkan salah satu faktor pada beban lingkungan sampai terjadi kegagalan *ultimate* pada material *straps*. Dalam analisis kali ini, faktor yang di-*increment*-kan adalah kecepatan arus.

Tegangan yang terjadi pada material *straps* merupakan kombinasi dari tegangan yang bekerja akibat gaya tegang *straps* dengan tegangan akibat beban lingkungan.

$$\sigma_{total} = \sigma_{strap} + \sigma_{env} \quad (26)$$

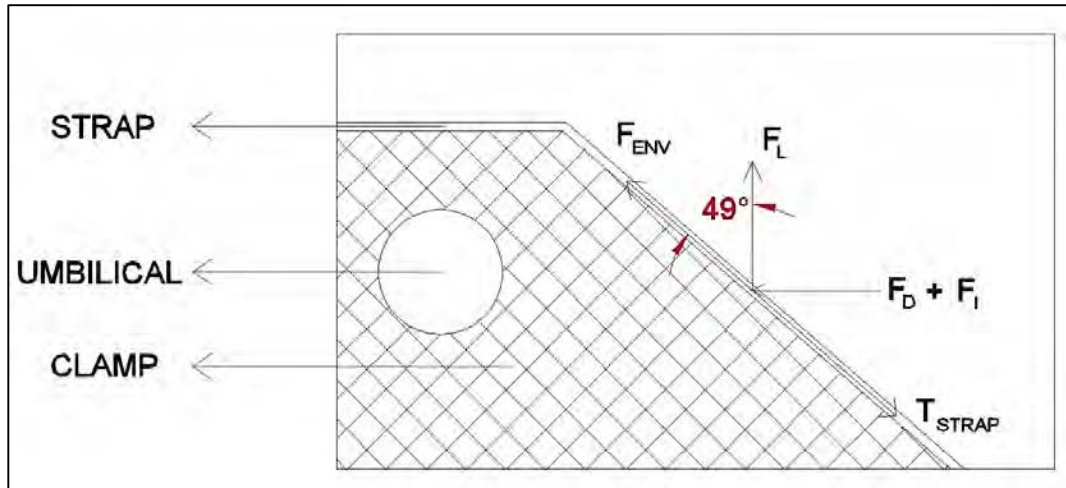
$$\sigma_{strap} = \frac{T_{strap}}{A} \quad (27)$$

$$\sigma_{env} = \frac{F_{env}}{A} \quad (28)$$

dengan,

σ_{total}	=	Tegangan total <i>straps</i> (Pa)
σ_{straps}	=	Tegangan akibat gaya tegang <i>straps</i> (Pa)
σ_{env}	=	Tegangan akibat gaya hidrodinamik (Pa)
T_{strap}	=	Gaya tegang <i>straps</i> (N)
F_{env}	=	Kombinasi gaya hidrodinamik (N)
A_{straps}	=	Luas penampang straps (m ²)

Gaya akibat beban lingkungan didapatkan dengan mengkombinasikan gaya horizontal dengan gaya vertikal yang bekerja pada umbilical cable. Gambar 2.8 memperlihatkan konfigurasi gaya lingkungan yang bekerja pada material *straps*



Gambar 2.8 Konfigurasi gaya lingkungan terhadap *straps*

$$F_{env} = \{(F_D + F_I) \sin 49 \times L\} + \{F_L \cos 49 \times L\} \quad (29)$$

dengan,

F_{env}	:	Gaya akibat beban lingkungan (N)
F_D	:	Gaya drag (N/m)
F_I	:	Gaya inersia (N/m)
F_L	:	Gaya lift (N/m)
L	:	Panjang umbilical (m)

ABS 2005 memberikan batas tegangan yang bekerja pada material sebesar 80% dari tegangan ultimatanya. Tegangan total yang bekerja pada material *straps* dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma_{total} \leq 0.8 SMTS \quad (30)$$

dengan,

σ_{total}	:	tegangan yang bekerja pada <i>straps</i> (MPa)
SMTS	:	<i>Specified Maximum Tensile Stress</i> (MPa)

2.7. Teori Kegagalan

Penentuan batas tegangan maksimal merupakan hal yang penting diperhatikan dalam suatu rekayasa teknik, karena berhubungan langsung dengan kemungkinan kegagalan material tersebut. Dalam menggunakan teori kegagalan, faktor yang penting adalah menentukan tegangan utama (*principal stress*) yang bekerja pada struktur. Kegagalan struktur dibedakan menjadi 6 berdasarkan tegangan utama penyebab kegagalannya, antara lain :

a. Teori Tegangan Normal Maksimum

Teori ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi bila salah satu dari tegangan utama (*principal stress*) sama dengan tegangan batas material. Sebagai contoh untuk tegangan utama setiap keadaan disusun dalam bentuk berikut :

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 \quad (31)$$

Jika kriteria kegagalan adalah titik luluh (*yield*), teori ini memperkirakan kegagalan akan terjadi bila :

$$\sigma_1 = S_{yt} \text{ dan } \sigma_3 = -S_{yc} \quad (32)$$

Dimana S_{yt} dan S_{yc} adalah kekuatan luluh material terhadap gaya tarik dan gaya tekan.

b. Teori Tegangan Geser Maksimum

Teori ini mengatakan bahwa kegagalan akan terjadi bila tegangan geser maksimum pada setiap elemen struktur sama dengan kekuatan geser dari material. Jika terdapat tegangan utama pada setiap keadaan tersusun dalam bentuk berikut :

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 \quad (33)$$

maka teori tegangan geser maksimal memperkirakan bahwa kegagalan akan terjadi bila :

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (34)$$

Teori ini menyatakan bahwa kekuatan luluh pada kekuatan geser diberikan oleh persamaan :

$$S_{sy} = 0.5 S_y \quad (35)$$

c. Teori Tegangan *Von Mises*

Teori kegagalan ini diperkenalkan oleh Huber (1904) dan disempurnakan oleh Von Mises dan Hencky, menyatakan bahwa kegagalan dispersi terjadi pada keadaan tegangan multi-aksial ketika energy distorsi per unit volume sama dengan atau lebih besar dari energi distorsi per unit volume saat terjadi kegagalan dalam pengujian tegangan uniaxial sederhana terhadap spesimen dari material yang sama.

d. Teori Gesekan Internal

Teori Gesekan internal banyak digunakan untuk pengujian kegagalan pada material berserat dan kaca dimana stuktur mikro terorientasi pada arah tegangan geser maksimum sebelum terjadinya kegagalan.

e. Modified Mohr Theory

Teori berikut dikembangkan dengan tujuan sesuai dengan data pengujian modifikasi yang dilakukan memberikan keakuratan lebih baik dalam memprediksi sifat material, terutama untuk material non-getas.

f. Teori Kelelahan

Pada teori ini, kegagalan disebabkan oleh akumulasi beban yang berulang mengenai struktur, sehingga terjadi kelelahan pada material penyusun struktur tersebut. Level tegangan penyebab kegagalan akibat kelelahan material struktur

biasanya berada di bawah tegangan yield material. Dalam menentukan umur struktur terhadap kemungkinan kegagalan akibat kelelahan material, digunakan diagram S-N yang dapat memberikan informasi jumlah siklus maksimal yang dapat diterima oleh material.

Pada umumnya, analisa tegangan ultimate struktur menggunakan teori kegagalan von mises, dimana beban yang diperhitungkan adalah beban tunggal dengan gaya multi-aksial yang dikombinasikan. Kombinasi gaya tersebut kemudian dibandingkan dengan batas tegangan ultimate materialnya untuk mengetahui keamanan struktur.

2.8. Metode Incremental

Incremental adalah suatu metode yang mengintegrasikan sebuah segmen dari suatu susunan sistem secara bertahap untuk mengidentifikasi suatu permasalahan dalam sistem. Metode Incremental banyak digunakan di bidang rekayasa teknik, perancangan dan pengujian software, analisa keandalan, dan lain-lain.

Metode incremental dapat dilakukan dengan 4 cara, yaitu :

1. Top-down

Pada metode ini, segmen ter-increment diturunkan dari sebuah nilai tertinggi dengan kontrol tertentu.

2. Bottom-up

Metode ini menaikkan segmen ter-increment dari sebuah nilai terendah sampai didapatkan kondisi hasil kondisi yang diinginkan

3. Regression testing

Pada metode ini dilakukan perubahan pada segmen ter-increment sampai kondisi sistem mengalami *abnormal behavior*.

4. Pengujian Smoke

Pengujian keseluruhan sistem dari kondisi awal dimulainya analisis.

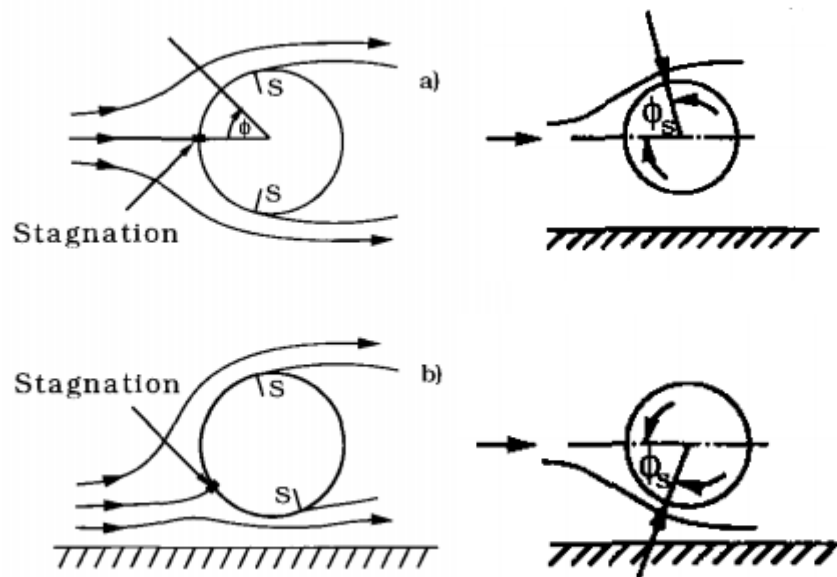
2.9. Pengaruh Bidang di Dekat Silinder Terhadap Aliran Fluida

Jika suatu struktur silinder ditempatkan pada posisi menggantung dengan jarak tertentu dari bidang datar, aliran yang melewati pipa akan mengalami

perubahan pola akibat dan pergeseran titik stagnasi dan *separation point*, sehingga terjadi perubahan *vortex shedding* pada aliran yang melewati struktur silinder.

Celah antara bidang datar dan silinder dapat memberikan pengaruh terhadap pola aliran fluida dengan ketentuan-ketentuan sebagai berikut (Sumer and Fredsoe, 2006) :

5. Perbandingan antara celah dengan diameter silinder tidak melebihi 0.3. Pada rasio yang melebihi persyaratan tersebut, *vortex shedding* akan mengalami tekanan sehingga memberikan pengaruh terhadap besarnya koefisien hidrodinamis aliran.
6. Titik stagnasi bergeser lebih rendah, dimana normalnya berada pada posisi $\phi = 0^\circ$ jika rasio antara gap dan diameter silinder sama dengan 1. Titik stagnasi akan bergeser sebesar kurang lebih 40° kebawah untuk setiap perubahan rasio sebesar -0.1.
7. Pergeseran *separation point*, yaitu titik lepasnya aliran yang menempel pada permukaan struktur silinder. Pergeseran *separation point* ditunjukkan dalam diagram berikut :



Gambar 2.9 Perubahan *stagnation point* dan *separation point* (Sumer and Fredsoe, 2006)

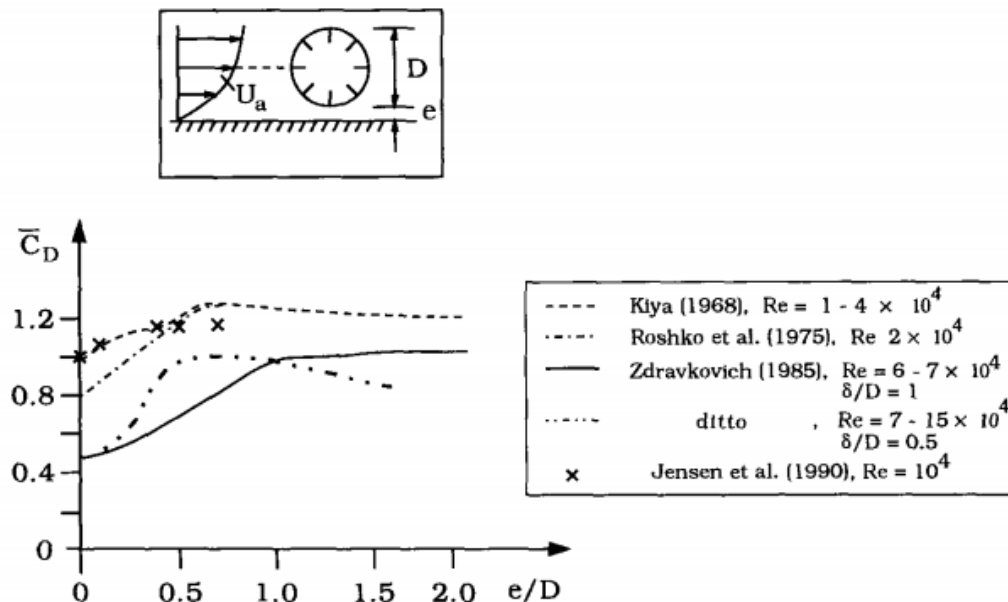
8. Pengaruh celah terhadap aliran fluida semakin kecil pada jarak silinder yang lebih jauh dari bidang datar. Pada posisi rasio antara celah dan diameter silinder

melebihi 0.3, keberadaan celah tidak lagi memberikan pengaruh terhadap aliran di sekitar silinder.

Perubahan aliran akibat pengaruh bidang datar di dekat struktur silinder memberikan pengaruh terhadap besarnya koefisien hidrodinamik aliran.

1. Drag Force pada Silinder di Dekat Bidang Datar

Pengaruh besarnya celah (e) terhadap aliran di sekitar silinder telah banyak di teliti oleh beberapa ilmuwan seperti Bearman dan Zdravkovich (1978), Kiya (1968), Roshko, Steinolfsson dan Chattoorgoon (1975), dan memberikan rekomendasi nilai koefisien drag untuk setiap nilai rasio e/D sebagaimana digambarkan pada grafik berikut :

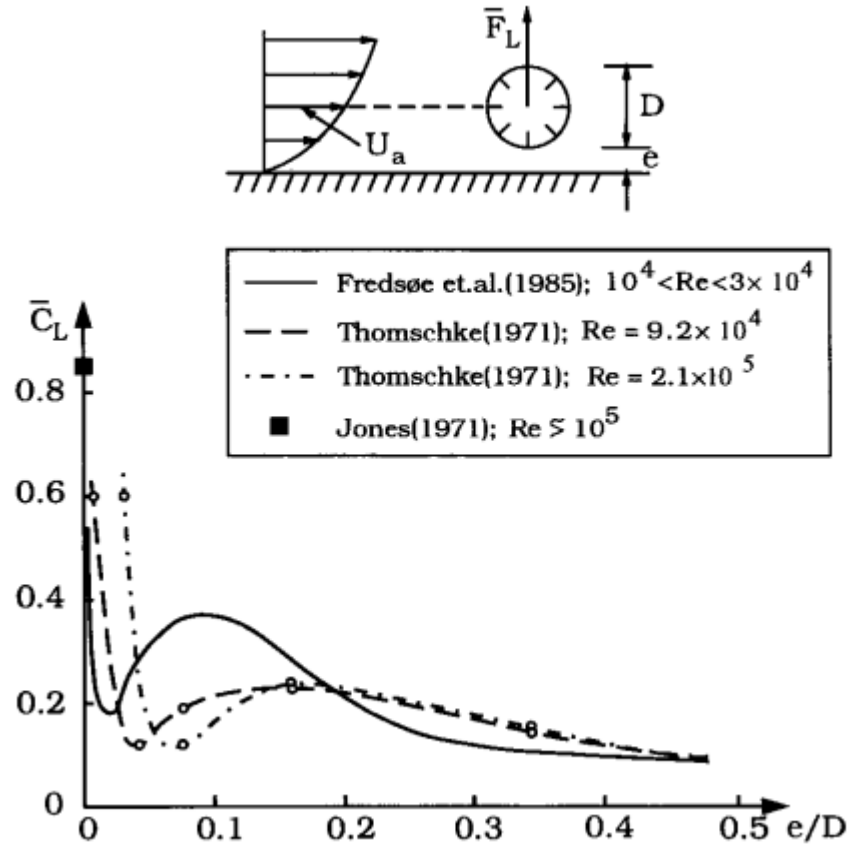


Gambar 2.10 Rekomendasi koefisien drag berdasarkan variasi *Reynold Number* (Sumer and Fredsoe, 2006)

2. Lift Force pada Silinder di Dekat Bidang Datar

Umumnya pola aliran pada silinder di dekat bidang datar berbentuk tidak simetris. Kondisi aliran simetri dapat dicapai pada rasio $e/D = 1$, dimana dapat dianggap bahwa aliran tidak memberikan gaya angkat (lift) pada struktur yang dikenai. Variasi perubahan koefisien lift akibat pengaruh celah antara stuktur

silinder dengan bidang datar dideskripsikan oleh beberapa peneliti berdasarkan nilai angka *reynold* aliran dalam beberapa grafik berikut :



Gambar 2.11 Rekomendasi koefisien lift berdasarkan variasi *Reynold Number* (Sumer and Fredsoe, 2006)

2.10. Metode Elemen Hingga (*Finite Elemen Method*)

2.10.1. Dasar Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*Finite Element Method*) atau sering disebut dengan FEM adalah konsep penyelesaian suatu permasalahan struktur dengan cara membagi obyek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terHINGGA. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan struktur. Kata "*finite*" atau terHINGGA digunakan untuk menekankan bahwa bagian-bagian kecil tersebut tidak tak terHINGGA, seperti yang lazim digunakan pada metode integral analitik.

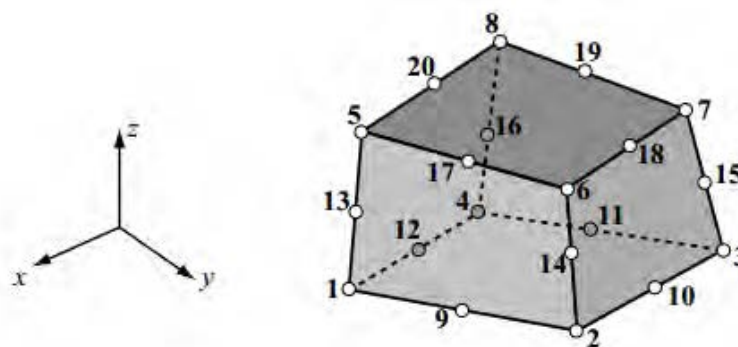
Membagi bagian analisis menjadi bagian-bagian kecil disebut diskritisasi. Bagian-bagian kecil ini disebut elemen, yang terdiri dari titik-titik sudut (disebut *nodal* atau *node*) dan daerah elemen yang terbentuk dari titik-titik tersebut. Membagi sebuah obyek menjadi bagian-bagian kecil secara fisika sebenarnya menuntun kita kepada pembuatan persamaan diferensial. Secara lebih matematis, FEM didefinisikan sebagai teknik numerik untuk menyelesaikan permasalahan struktur yang dinyatakan dalam persamaan diferensial.

Konsep dasar Metode Elemen Hingga adalah sebagai berikut :

1. Menjadikan elemen-elemen diskrit untuk memperoleh simpangan-simpangan dan gaya-gaya anggota dari suatu struktur
2. Menggunakan elemen-elemen kontinum untuk memperoleh solusi pendekatan terhadap permasalahan-permasalahan perpindahan panas, mekanika fluida dan mekanika solid.

2.10.2. Metode Elemen Hingga dalam ANSYS

ANSYS adalah program paket yang dapat memodelkan elemen hingga untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan mekanika, termasuk di dalamnya masalah statik, dinamik, analisis struktural (baik linier maupun nonlinier), masalah perpindahan panas, masalah fluida dan juga masalah yang berhubungan dengan akustik dan elektromagnetik. *Software* ini menjadikan bentuk fisik model struktur sebagai suatu sistem linier yang berkesinambungan dengan cara membagi bentuk fisik tersebut menjadi kelompok elemen-elemen yang lebih kecil (*meshing*). Elemen-elemen ini dihubungkan dengan simpul-simpul (*nodes*) sehingga menjadi satu sistem yang kontinyu.



Gambar 2.12 Contoh gambar *solid elements* dengan *nodes* (Cook, 1989)

Untuk menyelesaikan permasalahan ini, beban akan ditambahkan secara bertahap dan berikut langkah-langkahnya :

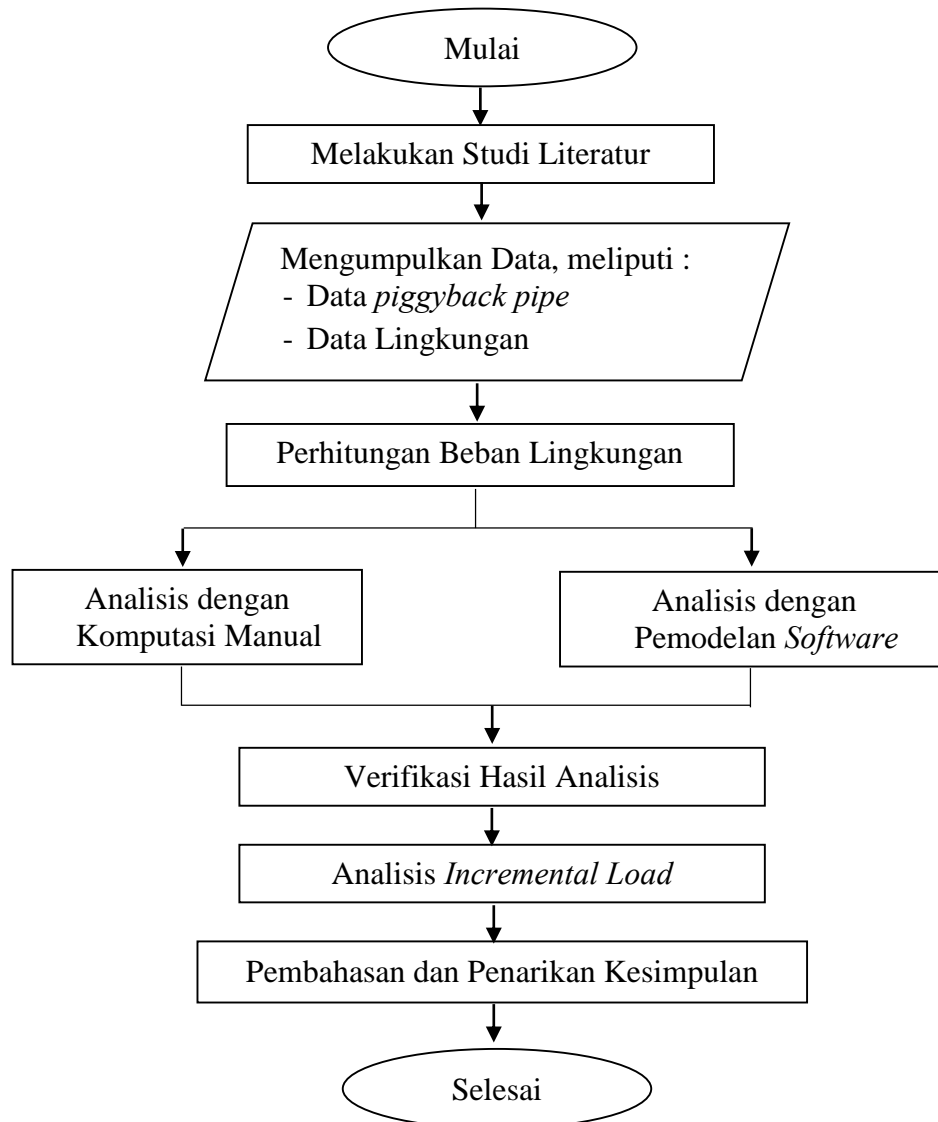
- a. Membuat geometri struktur pada ANSYS 14.5 baik menentukan ukuran, properties, tipe elemen, dan menentukan ukuran *mesh*.
- b. *Meshing* model yang sudah dibuat.
- c. Menentukan tipe analisis, memasukkan beban serta gaya-gaya yang mengenai struktur dan menentukan *boundary condition*.
- d. Menganalisa hasil yang keluar dari Ansys berupa bentuk deformasi dan tegangan maksimum yang terjadi akibat beban yang bekerja.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Pengerjaan



Gambar 3.1 *Flowchart* Metode Analisis

3.2. Prosedur Penelitian

Tahapan dalam pengerjaan penelitian ini meliputi :

3.2.1. Studi Literatur

Studi literatur ini dilakukan dengan mencari, mempelajari, serta memahami literatur berupa jurnal, buku-buku, dan laporan tugas akhir alumni baik dari institusi sendiri maupun dari institusi lain yang berkaitan dengan rumusan masalah dalam penelitian. Literatur-literatur tersebut juga digunakan sebagai acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

3.2.2. Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini dibutuhkan beberapa data, antara lain data material pipa, data material *clamp*, data material *strap*, data lingkungan dan konfigurasi sistem *piggyback*. Data didapatkan dari PT. ZEE Indonesia, yaitu proyek yang berlokasi di 15 Km lepas pantai perairan timur India. Berikut adalah rincian data yang digunakan :

a. Data Pipa

Data pipa yang digunakan adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Data Pipa

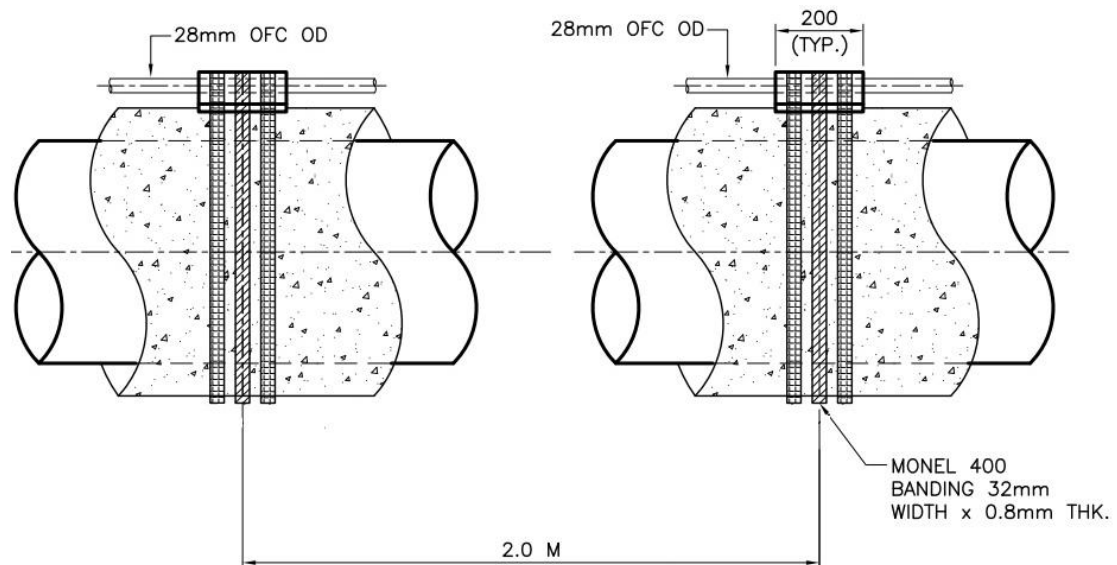
PARAMETER	UNIT	DATA
<i>Outside Diameter</i>	Mm	508
<i>Wall thickness</i>	Mm	19.1
<i>Material</i>	-	API 5L-GR X65 PSL2 CS NACE
<i>Steel Density</i>	kg/m ³	7850
SMYS	MPa	450
SMTS	MPa	535
<i>Young Modulus</i>	MPa	2.07×10^5
<i>Poisson ratio</i>	-	0.3

Pipa dilapisi dengan *anti corrosion coating* dan *concrete weight coating* dengan data sebagai berikut :

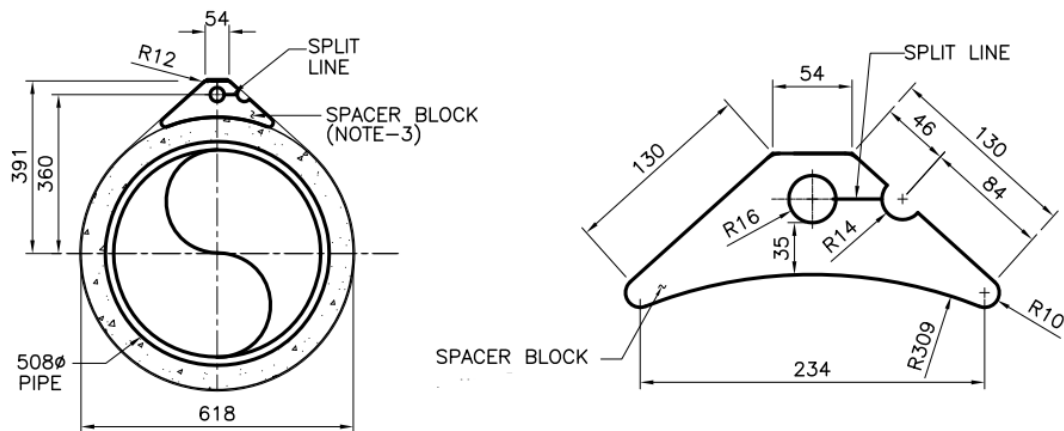
Tabel 3.2 Data Coating

PARAMETER	UNIT	DATA
<i>Data Anti Corrosion Coating</i>		
Material	-	CTE
<i>Thickness</i>	mm	4.75
<i>Density</i>	kg/m ³	1400
<i>Data Concrete Weight Coating</i>		
Material	-	HDCC
<i>Thickness</i>	mm	70
<i>Density</i>	kg/m ³	3044

Berikut adalah data berupa *drawing* dari *clamp* yang digunakan :



Gambar 3.2 Penampang samping *clamp* pada *piggyback pipe*



Gambar 3.3 Penampang depan *clamp* pada *piggyback pipe*

b. Data Clamp

Material clamp adalah karet EPDM Elastokan rubber dengan deskripsi material sebagai berikut :

Tabel 3.3 Data *Clamp*

PARAMETER	UNIT	DATA
<i>Material</i>	EPDM Elastokan rubber	
SMYS	MPa	85
<i>Modulus Young</i>	MPa	7×10^3
<i>Poisson Ratio</i>	-	0.499
<i>Elongation</i>	%	135

c. Data *Straps*

Straps yang digunakan pada sistem *piggyback* dalam kasus ini adalah MONEL 400 dengan deskripsi material sebagai berikut :

Tabel 3.4 *Data Straps*

PARAMETER	UNIT	DATA
<i>Material</i>	MONEL 400	
<i>Density</i>	Lb/in ³	0.318
SMYS	Ksi	30
SMTS	Ksi	80
<i>Modulus Young</i>	Ksi	2.6×10^4
<i>Thickness</i>	mm	0.8
<i>Width</i>	mm	32
<i>Tension</i>	kN	0.67
<i>Number of straps</i>	-	3

d. *Data Umbilical Cable*

Berikut adalah data *umbilical cable* yang ditopang oleh sistem *piggyback* :

Tabel 3.5 *Data Umbilical Cable*

PARAMETER	UNIT	DATA
<i>Diameter</i>	mm	28
SMYS	MPa	115
<i>Modulus young</i>	MPa	8.1×10^4
<i>Poisson ratio</i>	-	0.4
<i>Weight submerge</i>	Kg/m	9.65

e. Data Lingkungan

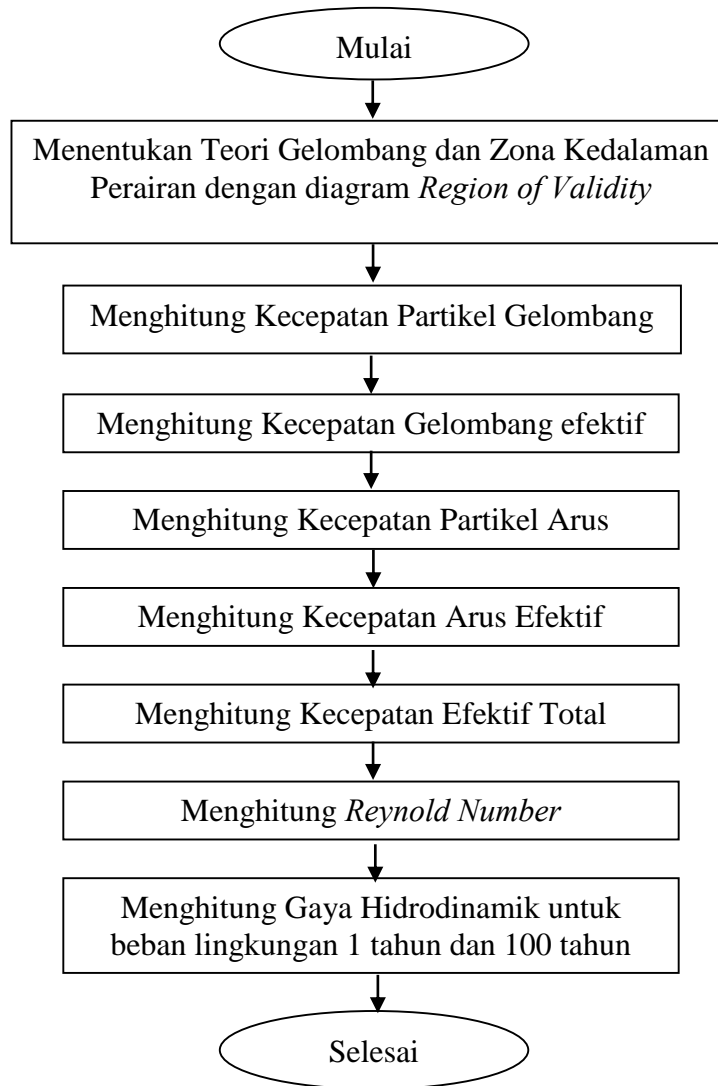
Tabel 3.5 Data Lingkungan

Kedalaman perairan

PARAMETER	UNIT	DATA
<i>Water depth</i>	m	49
<i>Significant wave height - 1 year</i>	m	5.4
<i>Significant wave height - 100 years</i>	m	7.2
<i>Significant wave periode - 1 year</i>	s	10.4
<i>Significant wave periode - 100 years</i>	s	12.6
<i>Current velocity – 1 year</i>	m/s	0.8
<i>Current velocity – 100 year</i>	m/s	1.8
<i>Phase</i>	rad	90
<i>Wave Dirrection</i>	°	90
<i>Current Direction</i>	°	90

3.2.3. Perhitungan Beban Lingkungan

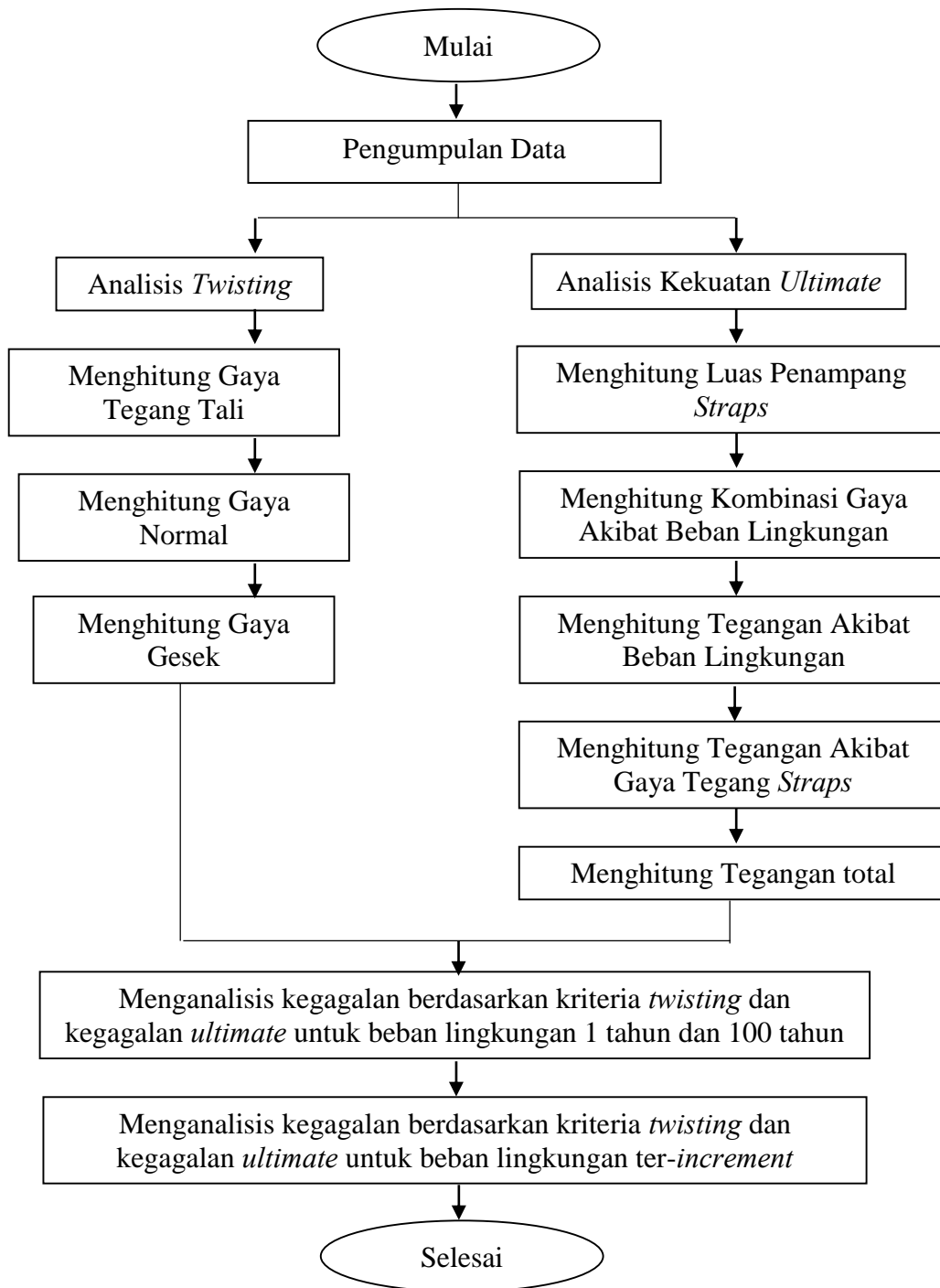
Beban lingkungan berupa gaya hidrodinamik yang pada tahap selanjutnya akan digunakan sebagai input *force* pada komputasi manual maupun pemodelan dengan *software*. Data yang digunakan dalam perhitungan beban lingkungan antara lain data kedalaman perairan, data gelombang dan data arus. Berikut adalah *breakdown flowchart* untuk perhitungan beban lingkungan :



Gambar 3.4 *Flowchart* Perhitungan Beban Lingkungan

3.2.4. Analisis dengan Komputasi Manual

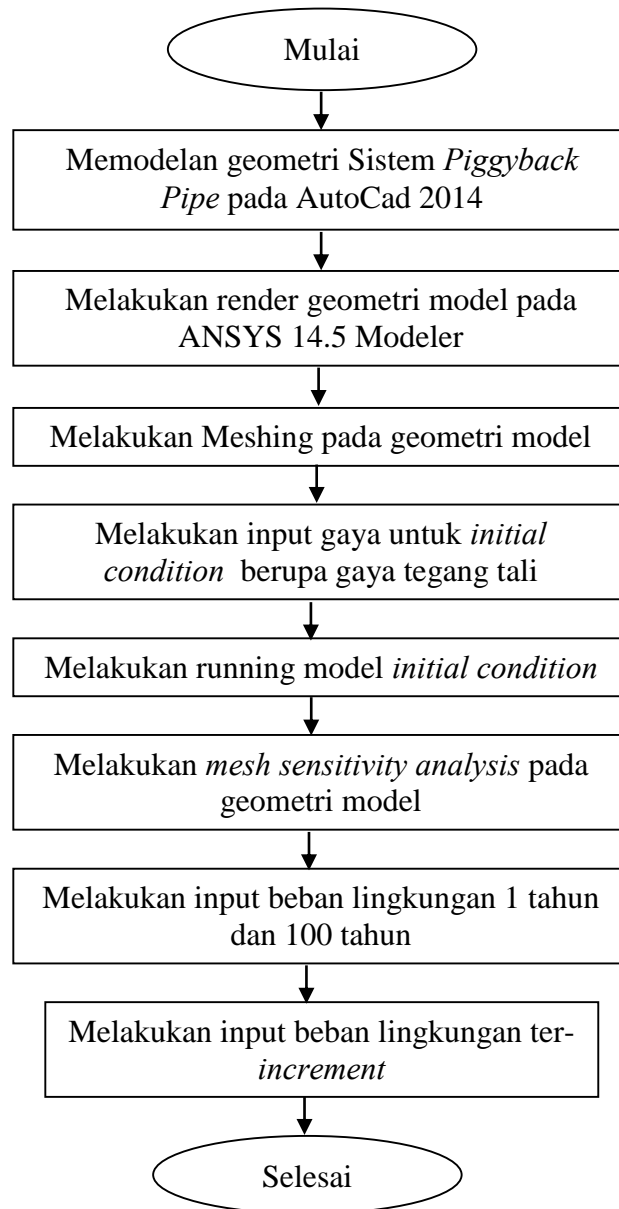
Analisis dengan komputasi manual dilakukan dengan menggunakan *software* Microsoft Excel 2013. Perhitungan berdasarkan teori dasar tegangan, teori kontak permukaan, dan teori elastisitas material dengan data yang dibutuhkan yaitu data material dan konfigurasi sistem *piggyback pipe*. Berikut adalah *breakdown Flowchart* untuk analisis dengan komputasi manual :



Gambar 3.5 *Flowchart* Analisis dengan Komputasi Manual

3.2.5. Analisis dengan Pemodelan *Software*

Pemodelan dengan *software* bertujuan untuk memberikan visualisasi hasil berdasarkan komputasi manual yang telah dilakukan. *Software* yang digunakan adalah ANSYS 14.5 *Structural Mechanics*. Geometri model dibuat dengan menggunakan *software* AutoCad 2014. Berikut adalah *breakdown flowchart* untuk analisis dengan pemodelan *software* :



Gambar 3.6 *Flowchart* Analisis dengan Pemodelan *Software*

3.2.6. Verifikasi Hasil

Pada tahap ini, hasil dari komputasi manual dan pemodelan *software* dipadukan untuk melihat keselarasannya.

3.2.7. Pembahasan dan Penarikan Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah didapatkan, dilakukan analisis hasil dan pembahasan, kemudian ditarik beberapa kesimpulan dari hasil analisis tersebut. Kesimpulan yang dihasilkan merupakan jawaban dari rumusan masalah analisis. Kekurangan dan penyempurnaan yang lain dirangkum dalam bentuk saran untuk pengembangan penelitian oleh analis selanjutnya.

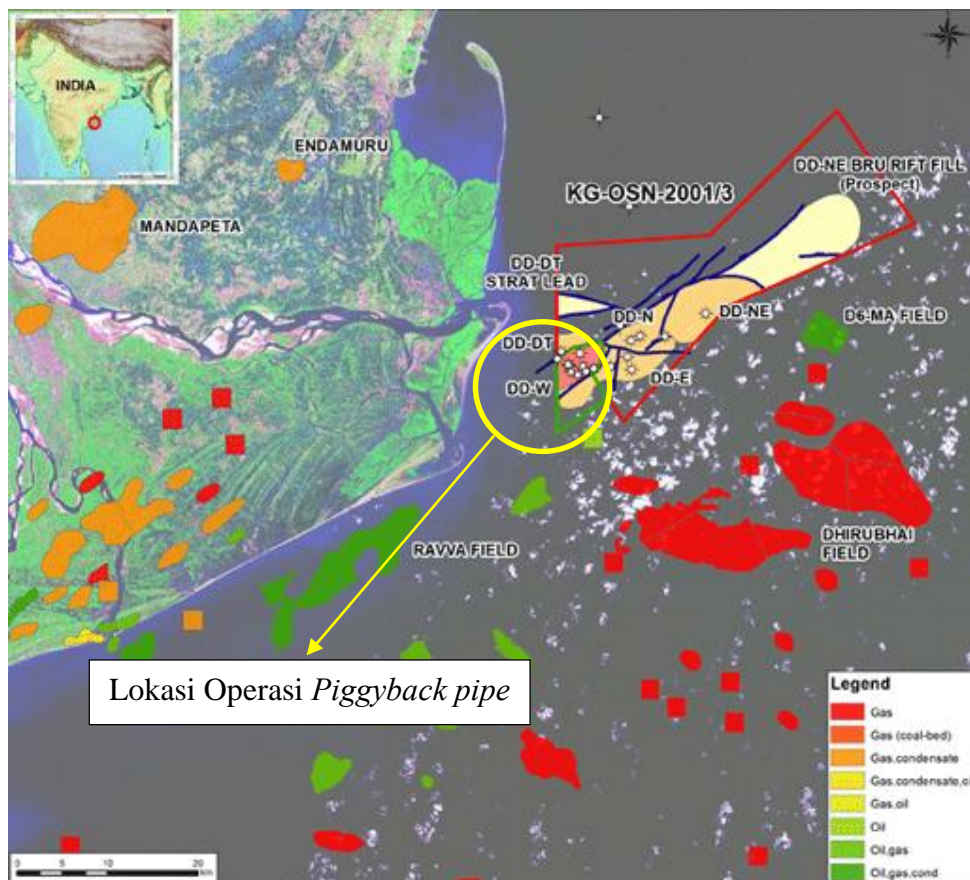
BAB IV

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Tugas akhir ini akan membahas mengenai *piggyback pipe*, yaitu pipa yang diinstal dengan ditumpangi obyek lain seperti kabel atau *umbilical*. Penggunaan *piggyback pipe* telah banyak dilakukan dalam industri perpipaan bawah laut, tujuannya adalah untuk meminimalkan biaya instalasi.

Topik yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah analisa terhadap kemungkinan *twisting* (puntiran) yang dapat terjadi pada ikatan *clamp* serta perhitungan kekuatan *ultimate straps* terhadap beban lingkungan ekstrem. *Piggyback pipe* yang akan dianalisa terinstall pada kedalaman 49 m, berlokasi di 15 Km lepas pantai selatan India. Analisis kekuatan *ultimate straps* menggunakan metode *incremental load* terhadap beban lingkungan, faktor yang di-increment-kan adalah kecepatan arus.



Gambar 4.1 Lokasi Operasi *Piggyback pipe*

4.2. Perhitungan Beban Lingkungan

Pengerjaan tahap ini bertujuan untuk mengetahui besarnya beban lingkungan yang bekerja pada sistem *piggyback pipe*. Perhitungan dilakukan berdasarkan persamaan (11) sampai dengan persamaan (20) yang telah tercantum pada Bab II Dasar Teori. Perhitungan beban lingkungan menggunakan Teori Orbital dengan hasil akhir berupa gaya drag, gaya inersia, dan gaya lift yang bekerja pada *umbilical*.

Perhitungan beban lingkungan dimulai dengan menentukan teori gelombang yang valid terhadap perairan lokasi *piggyback pipe* dengan menggunakan diagram *Region of validity* seperti yang tercantum pada Bab II Dasar Teori Gambar 2.7. Hasil dari diagram tersebut menunjukkan teori gelombang yang berlaku pada lingkungan yang dianalisis, sehingga dapat ditentukan persamaan untuk menghitung kecepatan partikel gelombang.

Besarnya kecepatan efektif total yang nantinya digunakan untuk menentukan *reynold number* didapatkan dari penjumlahan kecepatan efektif gelombang dan kecepatan efektif arus. *Reynold number* digunakan untuk menentukan besarnya koefisien hidrodinamik.

Dari perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan teori gelombang yang valid pada perairan perairan lokasi *piggyback pipe* adalah teori gelombang Stokes orde 2. Kedalaman perairan masuk ke zona kedalaman intermediet, sehingga pengaruh gelombang dan arus dikombinasikan. Hasil dari perhitungan beban lingkungan berupa gaya hidrodinamik pada beban lingkungan 1 tahun dan 100 tahun dirangkum dalam tabel berikut, detail perhitungan tercantum pada lampiran.

Tabel 4.1 Rangkuman hasil perhitungan beban lingkungan

Parameter	Unit	1 tahun	100 tahun
F_D	N/m	4.9	9.3
F_I	N/m	4.3	9.0
F_L	N/m	5.7	10.7

4.3. Analisis dengan Komputasi Manual

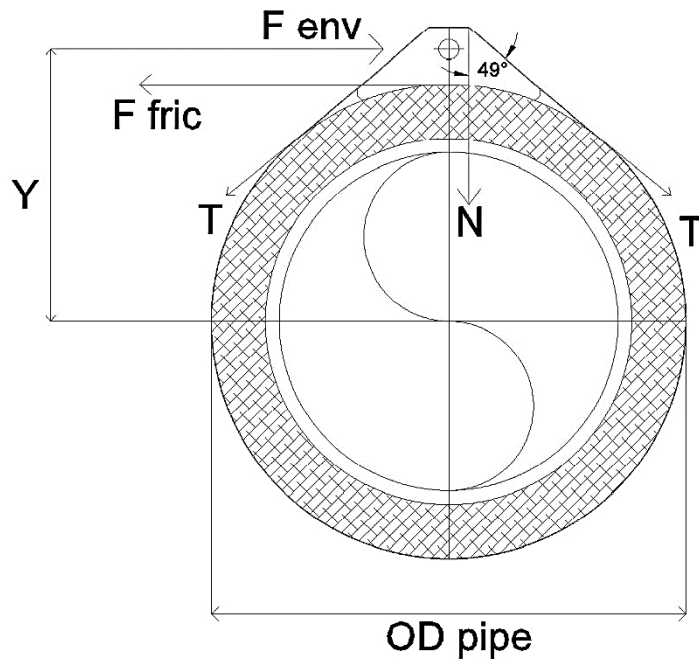
Dasar-dasar dari analisis dengan komputasi manual adalah teori tegangan, teori kontak permukaan dan teori kekuatan material. Analisis dengan komputasi manual dilakukan dalam dua tahap, yaitu analisis *twisting* pada ikatan *clamp* dan analisis kekuatan *ultimate* pada *straps*.

4.3.1. Analisis *Twisting*

Ikatan *clamp* pada sistem *piggyback pipe* dikatakan mengalami *twisting* jika posisinya bergeser akibat terkena beban lingkungan. Analisis dilakukan pada interaksi antara permukaan *clamp* dengan permukaan pipa.

Straps diikatkan pada pipa dengan kekuatan tertentu, dalam kasus ini adalah sebesar 0.67 kN tiap *straps*. Gaya tegang yang bekerja pada *straps* memberikan pengaruh berupa gaya normal terhadap *clamp*, nilai gaya normal yang terjadi akibat gaya tegang *straps* dapat diketahui dengan persamaan (23) yang tercantum pada Bab II Dasar Teori. Dengan mengalikan gaya normal tersebut dengan koefisien kekasaran permukaan *clamp* dan pipa, maka didapatkan gaya gesek yang bekerja pada interaksi kedua permukaan tersebut.

Ikatan *clamp* dalam keadaan stabil jika gaya gesek yang bekerja pada interaksi permukaan *clamp* dan pipa mampu mempertahankan kedudukan *clamp*. Sesuai persamaan (21), besarnya momen akibat gaya lingkungan nilainya harus lebih kecil daripada momen yang dihasilkan oleh gaya gesek antara permukaan *clamp* dan pipa.



Gambar 4.2 Konfigurasi Gaya pada *Clamp*

Beban hidrodinamik berupa gaya drag dan gaya inersia bekerja pada arah horizontal dengan arah datang tegak lurus terhadap sumbu pipa.

$$F_H = (F_D + F_I) \times L$$

dengan,

- F_D : Gaya drag (N/m)
- F_I : Gaya inersia (N/m)
- L : Panjang *umbilical* (m)

Sedangkan gaya lift bekerja pada arah vertikal, gaya lift yang bekerja pada *umbilical* dapat mengurangi gaya normal akibat gaya tegang *straps*.

$$F_V = N - (F_L \times L)$$

dengan,

- N : Gaya normal (N)
- F_L : Gaya lift (N/m)
- L : Panjang *umbilical* (m)

Dalam menganalisis kemungkinan *stwisting* yang terjadi pada ikatan *clamp piggyback pipe*, kriteria kegagalan yang digunakan adalah :

$$F_H \times Y \leq F_{fric} \times \frac{1}{2} OD_{tot}$$

dengan,

- F_H : Gaya hidrodinamik arah horizontal (N)
- Y : Titik tangkap gaya ditinjau dari *center point* pipa (m)
- F_{fric} : Gaya gesek (N)
- OD : Diameter Luar (m)
- μ : Koefisien *friction* permukaan *clamp*

Hasil dari analisis *twisting* dengan komputasi manual pada beban lingkungan 1 tahun dan 100 tahun dirangkum dalam tabel berikut, detil perhitungan tercantum pada Lampiran 2.

Tabel 4.2 Rangkuman hasil perhitungan beban lingkungan

Kondisi Pembebanan	$F_H \times Y$ (N)	$F_{FRIC} \times 0.5OD_{pipe}$ (N)	<i>Twisting</i>
Beban 1 tahun	7.01	431.63	OK
Beban 100 tahun	13.83	429.99	OK

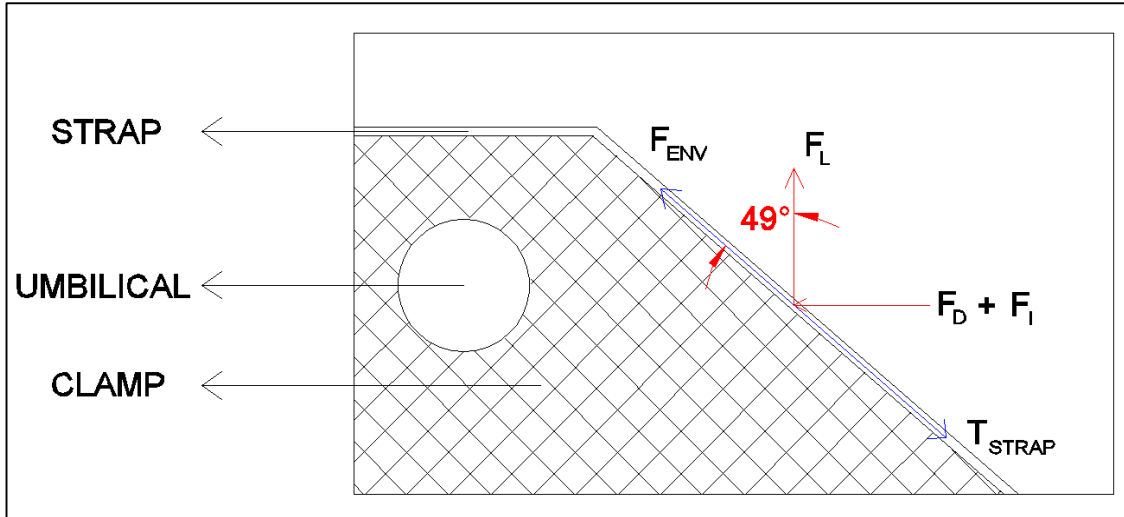
4.3.2. Analisis Kekuatan *Ultimate*

Material *straps* memiliki tegangan ijin yang menjadi batas aman untuk total tegangan yang boleh bekerja pada *straps*. Total tegangan yang dimaksud terdiri dari tegangan tali dan tegangan akibat beban lingkungan yang bekerja pada sistem. Pada kriteria batas tegangan *ultimate* yang diberikan oleh ABS, kegagalan *ultimate* terjadi pada nilai tegangan yang melebihi 80% tegangan *ultimate* material. Batas keamanan tegangan pada suatu material disyaratkan sebagai berikut :

$$\sigma_{total} \leq 0.8 \times SMTS$$

dengan,

σ_{total} : Total tegangan yang bekerja pada *straps* (MPa)
 SMTS : *Specified Maximum Tensile Stress* (MPa)



Gambar 4.3 Konfigurasi Gaya pada *Straps*

Hasil dari analisis kekuatan *ultimate straps* dengan komputasi manual pada beban lingkungan 1 tahun dan 100 tahun dirangkum dalam tabel berikut, detail perhitungan tercantum pada lampiran.

Tabel 4.3 Hasil analisa tegangan *straps* dengan komputasi manual

	σ_{total} (MPa)	$0.8 \times SMTS$ (MPa)	Kekuatan <i>Ultimate</i>
Beban 1 tahun	26.45	441.28	OK
Beban 100 tahun	26.71		OK

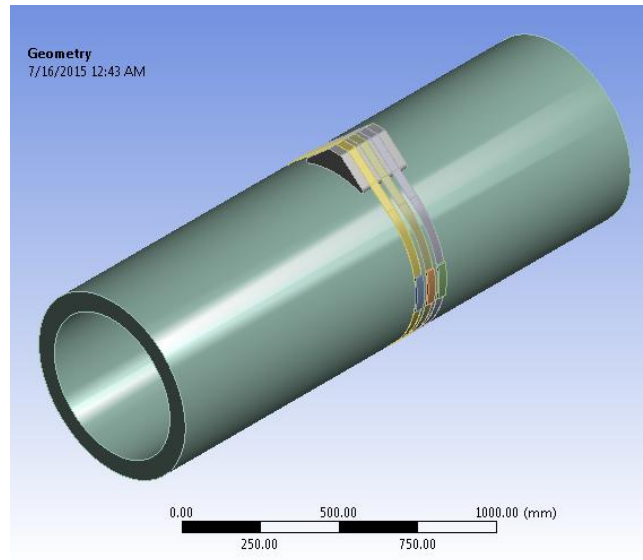
4.4. Analisis dengan Pemodelan *Software*

Pemodelan dilakukan untuk mengetahui visualisasi hasil dari analisa *twisting* dan kekuatan *ultimate* pada sistem *piggyback pipe*. *Software* yang digunakan dalam melakukan pemodelan tersebut adalah ANSYS 14.5.

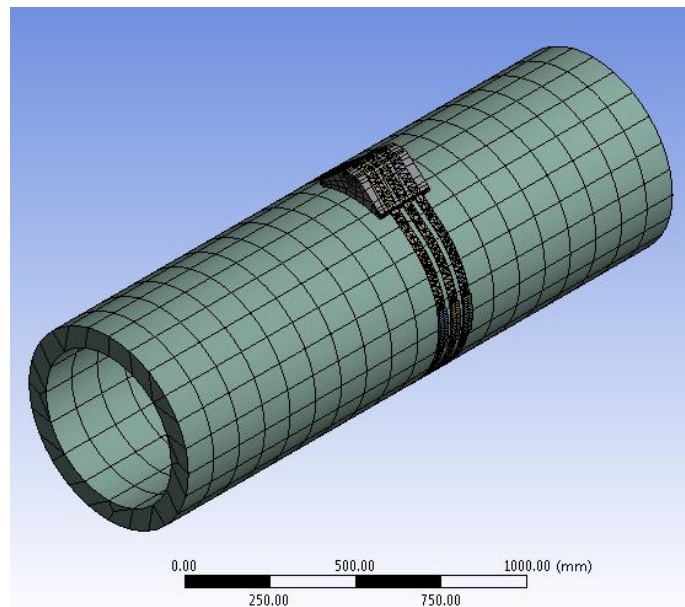
Pada tahap pemodelan, sistem *piggyback* mengambil input beban dari hasil perhitungan beban lingkungan yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya. Hasil

pemodelan berupa *contact status* menunjukkan kondisi interaksi permukaan antara material *clamp* dan pipa, serta tegangan *equivalent* yang bekerja pada *straps*.

Berikut adalah gambar geometri pemodelan dengan menggunakan *software* ANSYS :



Gambar 4.4 Bentuk Geometri Model *Piggyback pipe*



Gambar 4.5 Meshing Model *Piggyback pipe*

4.4.1. Model *Intial Condition*

Model pertama yang dibuat adalah model pada *initial condition*, dimana sistem *piggyback pipe* dianggap belum terkena beban lingkungan, sehingga gaya

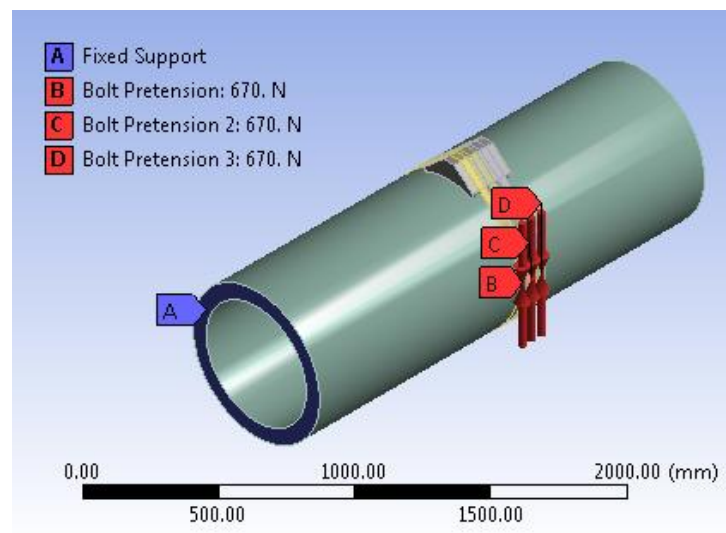
yang bekerja hanya gaya tegang *straps*. Berikut adalah perhitungan tegangan *straps* pada *initial condition* :

$$\sigma_{strap} = \frac{T_{strap}}{A}$$

$$\sigma_{strap} = \frac{670}{32 \times 0.8}$$

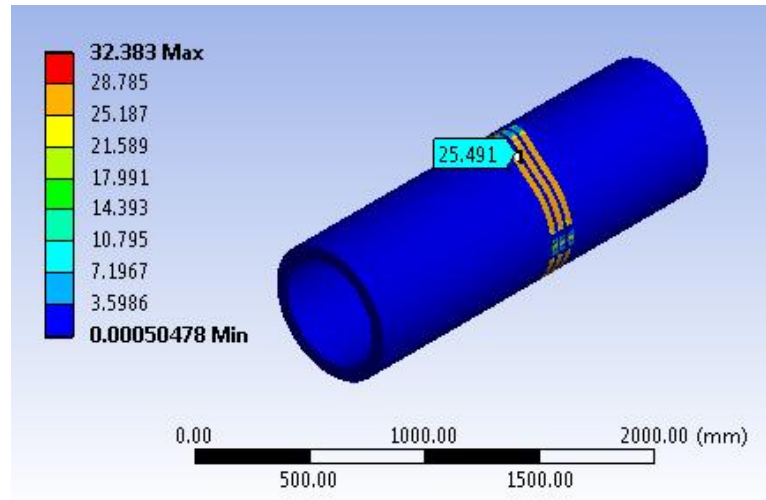
$$\sigma_{strap} = 26.17 \text{ MPa}$$

Pada *software* ANSYS, gaya tegang *straps* dimodelkan dengan *bolt pretension*. Gambar 4.6 memperlihatkan input gaya pada model *initial condition* :



Gambar 4.6 Model *Initial Condition*

Hasil running untuk initial condition adalah sebagai berikut :



Gambar 4.7 Hasil running *Initial Condition*

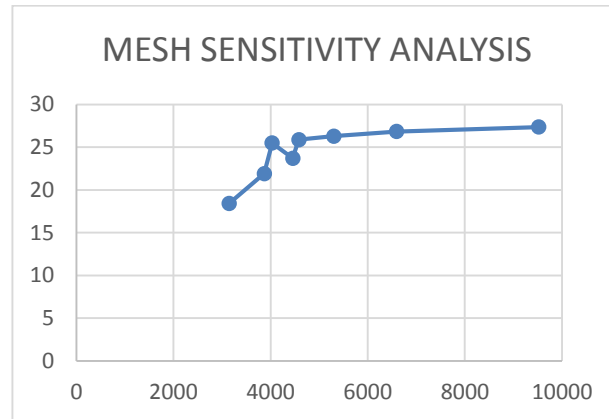
4.4.2. *Mesh Sensitivity Analysis*

Untuk menentukan ukuran *meshing* dalam pemodelan ANSYS, terlebih dahulu dilakukan *mesh sensitivity analysis*. Ukuran *meshing* divariasikan hingga didapatkan nilai tegangan yang cenderung konstan, sedangkan nilai beban sebagai input adalah nilai yang tetap. Tujuan dari *mesh sensitivity analysis* adalah untuk mendapatkan ukuran *meshing* yang tepat sehingga *output* yang dihasilkan tidak fluktuatif dengan berubahnya ukuran *meshing*.

Berikut adalah rangkuman hasil *Mesh Sensitivity Analysis*, hasil pemodelan tercantum pada lampiran :

Tabel 4.4 Hasil *Mesh Sensitivity Analysis*

MESHING SIZE (mm)	NUMBER OF ELEMENT	STRESS (MPa)	KOREKSI (%)
45	3147	18.43	-
30	3868	21.91	15.883
20	4030	25.5	14.078
15	4455	23.71	7.550
13	4581	25.88	8.385
10	5304	26.3	1.597
7	6590	26.85	2.048
5	9518	27.37	1.900



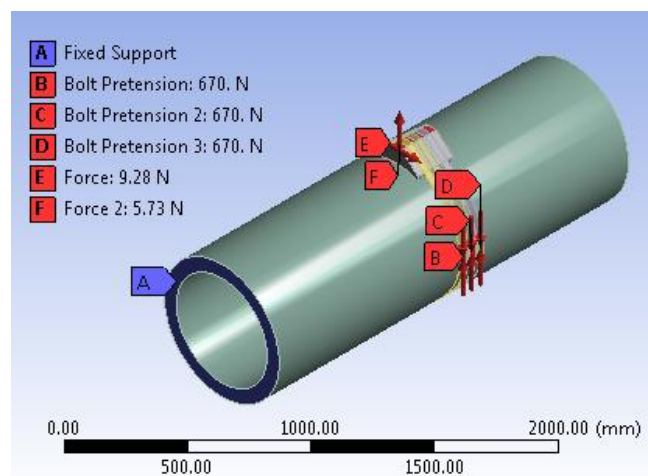
Gambar 4.8 Grafik hubungan jumlah elemen dengan tegangan

Dari hasil tersebut, didapatkan nilai *meshing* dengan koreksi terkecil adalah pada ukuran *meshing* 10 mm. Sehingga ukuran *meshing* yang digunakan dalam pemodelan selanjutnya adalah 10 mm.

4.4.3. Pemodelan Sistem *Piggyback pipe*

Pada tahap ini, beban lingkungan dimasukkan pada model *initial condition* yang telah disesuaikan ukuran *meshing*nya. Beban lingkungan terdiri dari gaya drag dan gaya inersia yang bekerja pada arah horizontal, serta gaya lift yang bekerja pada arah vertikal. *Boundary condition* pada pipa adalah fixed pada kedua ujungnya.

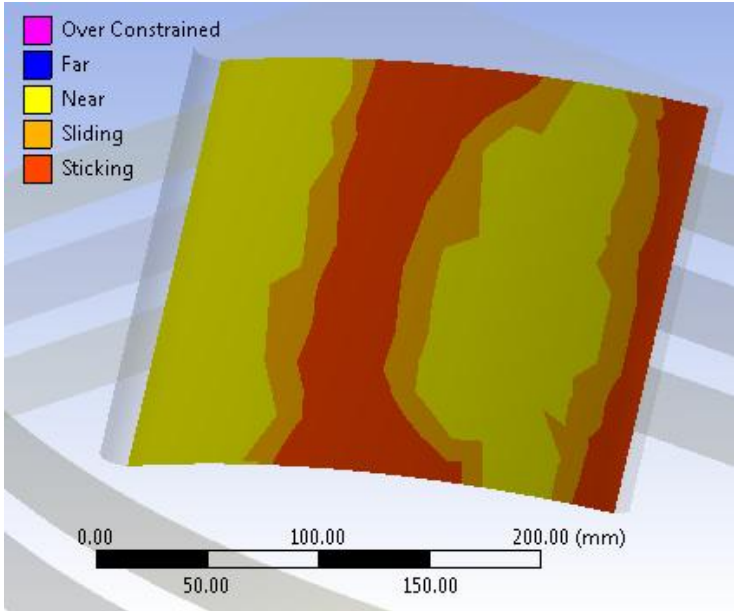
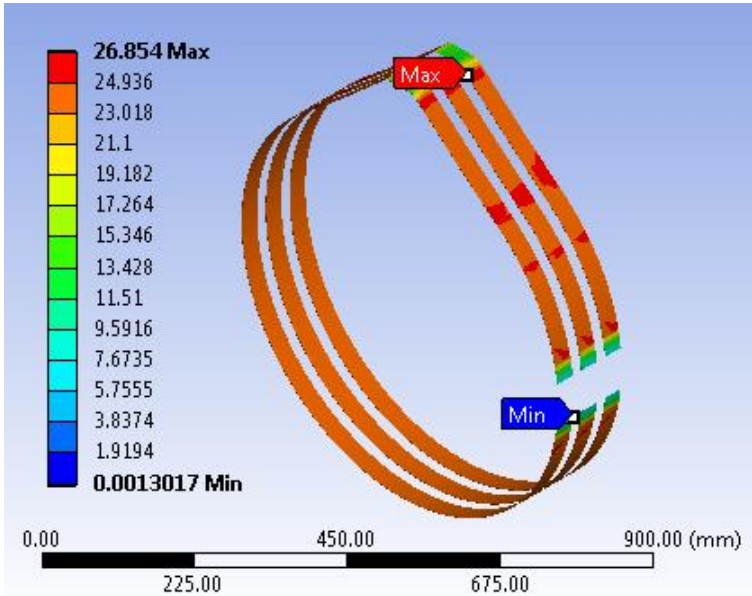
Berikut adalah gambar konfigurasi gaya dan *boundary condition* pada model sistem *piggyback pipe* :

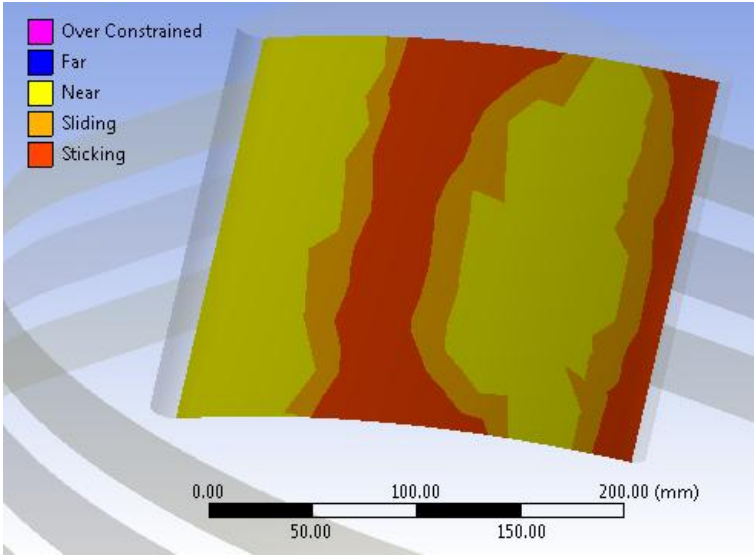
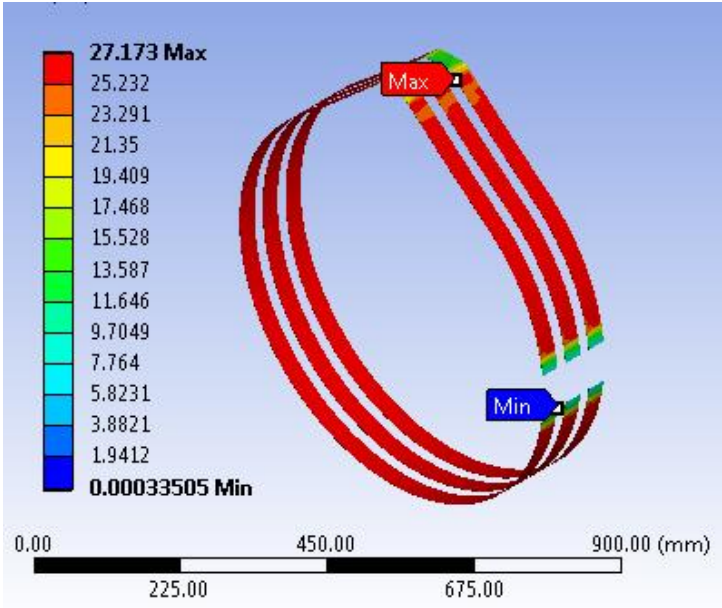


Gambar 4.9 Konfigurasi Gaya dan *Boundary Condition*

Hasil yang didapatkan dari *running* model pada *software* ANSYS 14.5 adalah sebagai berikut :

Tabel 4.5 Hasil pemodelan dengan *software* ANSYS 14.5

Beban	Uc (m/s)	Hasil	Status
1 tahun	0.8	<p>Contact status :</p> 	OK
		<p>Equivalen Stress :</p> 	OK

Beban	Uc (m/s)	Hasil	
100 tahun	1.08	<p>Contact status :</p> 	OK
		<p>Equivalen Stress :</p> 	OK

4.5. Perhitungan *Incremental Load*

Incremental load adalah metode yang dilakukan untuk mengetahui besarnya beban lingkungan dimana sistem mulai mengalami *twisting* atau kegagalan *ultimate*, yaitu dengan menaikkan beban lingkungan secara bertahap, sampai ditemukan titik kegagalan sistem.

Dalam analisa ini, beban yang di-*increment*-kan adalah kecepatan arus. Pemilihan faktor kecepatan arus sebagai faktor ter-*increment* adalah dikarenakan kondisi pipa yang meletak di seabed, sehingga beban arus pengaruhnya lebih besar dibandingkan beban gelombang. Selain itu, juga karena beban arus di alam sifatnya lebih fluktuatif (mudah berubah) dibandingkan beban gelombang. Kecepatan arus dinaikkan sebesar 30% setiap tahap, sampai sistem mengalami *twisting* dan *straps* mengalami kegagalan *ultimate*. Nilai kecepatan arus yang semakin besar akan mempengaruhi besarnya gaya hidrostatik yang bekerja pada struktur pipa.

Analisa *incremental load* diawali dengan perhitungan manual, kemudian dilakukan pemodelan untuk mendapatkan gambaran visual dari perhitungan yang telah dilakukan. Hasil dari perhitungan manual diringkaskan pada table berikut :

Tabel 4.6 Perhitungan *incremental load* untuk analisis *twisting*

Tahap	U _C (m/s)	Gaya Hidrodinamik			F _{FRIC} (N)	F _H (N)	F _{FRIC} ×0.5OD _{PIPE} (N)	F _H x Y (N)	Twisting
		F _D (N/m)	F _I (N/m)	F _L (N/m)					
1	1.44	16.03	9.00	18.50	1300.18	50.07	427.43	18.92	OK
2	1.92	28.51	9.00	32.89	1285.79	75.02	422.70	28.34	OK
3	2.56	50.68	9.00	58.47	1260.21	119.36	414.29	45.09	OK
4	3.41	110.88	9.00	69.30	1249.38	239.77	410.73	90.57	OK
5	4.55	197.12	9.00	123.20	1195.48	412.25	393.01	155.73	OK
6	6.07	350.44	9.00	219.02	1099.66	718.88	361.51	271.56	OK
7	8.09	438.37	9.00	372.83	945.85	894.75	310.95	337.99	FAIL
8	10.79	686.07	9.00	606.85	711.83	1390.15	234.01	525.13	FAIL

Tabel 4.7 Perhitungan *incremental load* untuk analisis kekuatan *ultimate*

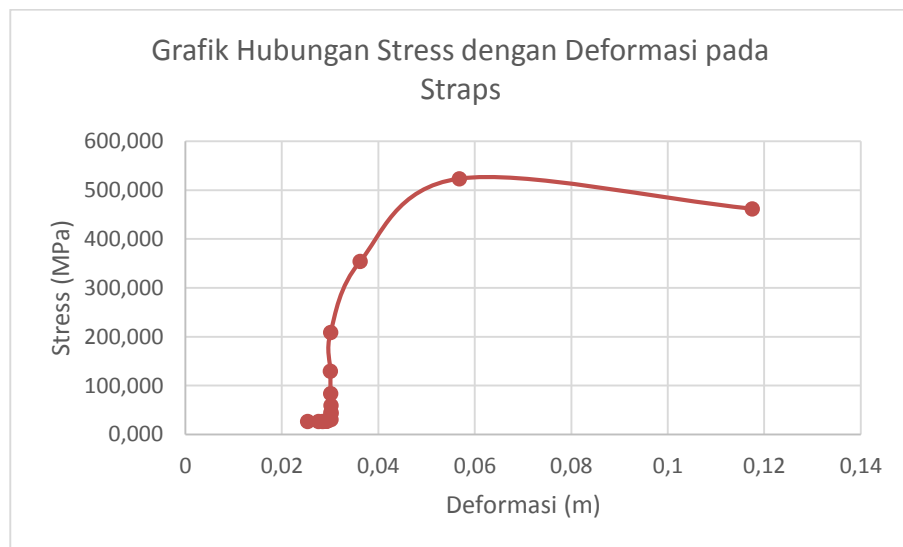
Tahap	U _c (m/s)	Gaya Hidrodinamik			F _{ENV} (N)	Tegangan <i>Straps</i>		Kekuatan <i>Ultimate</i>
		F _D (N/m)	F _I (N/m)	F _L (N/m)		σ _{TOTAL} (MPa)	0.8×SMTS (MPa)	
1	1.44	16.03	9.00	18.50	62.07	26.98	441.28	OK
2	1.92	28.51	9.00	32.89	99.77	27.47		OK
3	2.56	50.68	9.00	58.47	166.80	28.34		OK
4	3.41	110.88	9.00	69.30	271.88	29.71		OK
5	4.55	197.12	9.00	123.20	472.78	32.33		OK
6	6.07	350.44	9.00	219.02	829.93	36.98		OK
7	8.09	438.37	9.00	372.83	1164.47	41.33		OK
8	10.79	484.55	9.80	484.55	1381.98	44.17		OK
9	14.38	861.43	6.75	861.43	2440.75	57.95		OK
10	19.18	1531.43	6.75	1531.43	4331.18	82.57		OK
11	25.57	2722.54	6.75	2722.54	7691.94	126.33		OK
12	34.09	4840.07	6.75	4840.07	13666.64	204.12		OK
13	45.46	8604.57	6.75	8604.57	24288.32	342.43		OK
14	60.61	15297.02	6.75	15297.02	43171.31	588.30		FAIL
15	80.82	27194.71	6.75	27194.71	76741.07	1025.40		FAIL

Dari hasil perhitungan tersebut, didapatkan bahwa *twisting* mulai terjadi pada kecepatan arus melebihi 6.07 m/s, sedangkan kegagalan *ultimate* terjadi pada kecepatan arus 60.61 m/s.

Hasil visualisasi perhitungan *incremental load* dalam bentuk pemodelan ANSYS tercantum pada lampiran. Tabel 4.8 merangkum tegangan dan seformasi yang terjadi pada struktur dari output software ANSYS, hubungan keduanya digambarkan dalam sebuah grafik pada gambar 4.10

Tabel 4.8 Rangkuman Hasil Pemodelan ANSYS untuk beban lingkungan ter-
increment

Beban	Uc (m/s)	Stress (MPa)	Deformation (m)
1 tahun	0.80	26.85	0.0254
100 tahun	1.08	27.17	0.0276
1	1.44	27.20	0.0285
2	1.92	27.32	0.0291
3	2.56	27.48	0.0293
4	3.41	27.79	0.0293
5	4.55	29.03	0.0295
6	6.07	30.86	0.0302
7	8.09	42.36	0.0302
8	10.79	45.75	0.0302
9	14.38	59.57	0.0302
10	19.18	83.60	0.0301
11	25.57	129.56	0.0301
12	34.09	209.15	0.0301
13	45.46	354.70	0.0363
14	60.61	523.67	0.0568
15	80.82	462.16	0.1175



Gambar 4.10 Grafik Hubungan Tegangan dengan Deformasi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

1. Pada pembebanan lingkungan 1 tahun dan 100 tahun, *clamp* pada sistem *piggyback pipe* tidak mengalami *twisting* dan material *straps* tidak mengalami kegagalan *ultimate*.
2. Ikatan *clamp* pada sistem *piggyback pipe* mengalami *twisting* pada *increment* ke-7 yaitu dengan kecepatan arus 8.09 m/s atau sebesar 7.5 kali beban lingkungan ekstremnya.
3. Material *straps* pada sistem *piggyback pipe* mengalami kegagalan *ultimate* pada *increment* ke-14 yaitu dengan kecepatan arus 60.61 m/s atau sebesar 56 kali beban lingkungan ekstremnya.

5.2. Saran

1. Diperlukan penelitian mengenai tegangan yang terjadi pada pipa dan umbilical cable pada saat sistem diinstall.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut pada kondisi pipa tidak stabil meletak pada *seabed*.
3. Analisa kekuatan material selanjutnya dapat dikembangkan menjadi analisa optimasi desain untuk mengoptimalkan dimensi berdasarkan beban lingkungan pada lokasi operasi *piggyback pipe*.
4. Perlu dilakukan analisa kerusakan dan resiko pada komponen lain jika terjadi kegagalan pada sistem ikatan *piggybak pipe*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- American Bureau of Shipping. 2006. *ABS : Guide for Building and Classing*. Houston.
- Bai, Y. 2001. *Pipeline and Riser*. Oxford : Elsevier Ocean Engineering Book Series.
- Boresi, A. P. dan Schmidt, R. J. 2003. *Advanced Mechanics of Material*. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- Carvill, J. 1993. *Mechanical Engineer's Data Book*. Oxford : Elsevier Science
- Det Norske Veritas Offshore Standards RP F109. 2012. *On-bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Norway.
- Febrian, D. 2013. *Perbandingan Analisa Free Span Menggunakan DNV RP F-105 "Freespanning Pipeline" dengan DNV 1981 "Rule for Submarine Pipelines System"*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Guo, B., Song, S., Chacko, J., dan Ghalambor, A. 2005. *Offshore Pipelines*. Oxford : Elsevier Ocean Engineering Book Series
- Halliwell, R. 1986. *An Introduction of Offshore Pipelines*. Cork : University
- Colle Mouselli, AH. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analisis, and Methods*. Oklahoma : Pennwell Books.
- Mouselli, AH. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analisis, and Methods*. Oklahoma : Pennwell Books.
- Paik, J. K., Thayambali, A.K. 2003. *Ultimate Limit State Design of Plated Structure*. Chicester. UK.
- Popov, E. P. 1984. *Mekanika Teknik*. Jakarta : Penerbit Erlangga. Book Series.

PT ZEE Indonesia. 2012. *Dokumen Proyek Deen Dayal Field*. Jakarta

Soegiono. 2007. *Pipa Laut*. Surabaya : Airlangga University Press.

Summer, B. M., Fredsoe, J. 2006. *Hydrodynamics around Cylindrical Structure*.
London. World Scientific Publishing.

Perhitungan Beban Lingkungan - 1 Tahun

$$\begin{array}{ll} H = & 5.4 \text{ m} \\ T = & 10.4 \text{ s} \end{array} \quad \begin{array}{ll} g = & 9.8 \text{ m/s}^2 \\ d = & 49 \text{ m} \end{array}$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} = \frac{9.8 \times 10.4^2}{2 \times 3.14} = 168.78 \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2 \times 3.14}{168.78} = 0.037 \text{ /m}$$

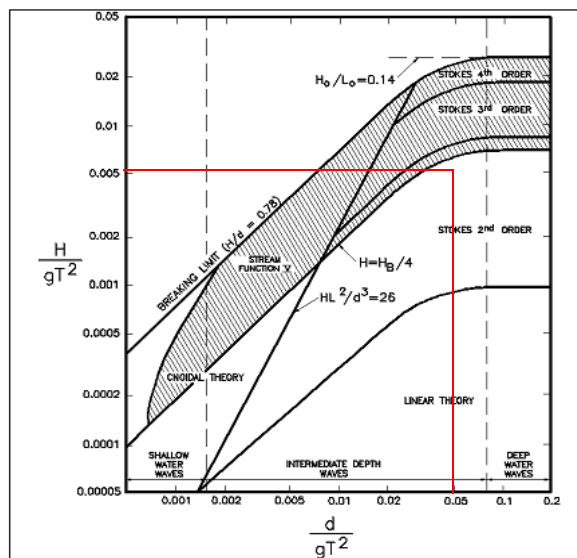
$$U_c = 0.8 \text{ m/s}$$

$$s = OD_{\text{pipe}} + a + 0.5 OD_{\text{umb}} = 0.7065 \text{ m}$$

1. Menentukan Teori Gelombang dan Zona Kedalaman Perairan

Dalam menentukan teori gelombang, digunakan grafik *Region of Validity* dengan dua parameter berikut :

$$\frac{H}{gT^2} = 0.005094 \quad \frac{d}{gT^2} = 0.04622781$$



Grafik *Region of Validity of Wave Theories*

Berdasarkan grafik diatas didapatkan :

Teori Gelombang : Stokes orde 2
Zona Kedalaman : *Intermediet depth waves*

2. Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang

Kecepatan partikel gelombang menurut teori Stokes orde 2 :

$$U_o = \frac{\pi H \cosh ks}{T \sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd} \cos 2\theta$$

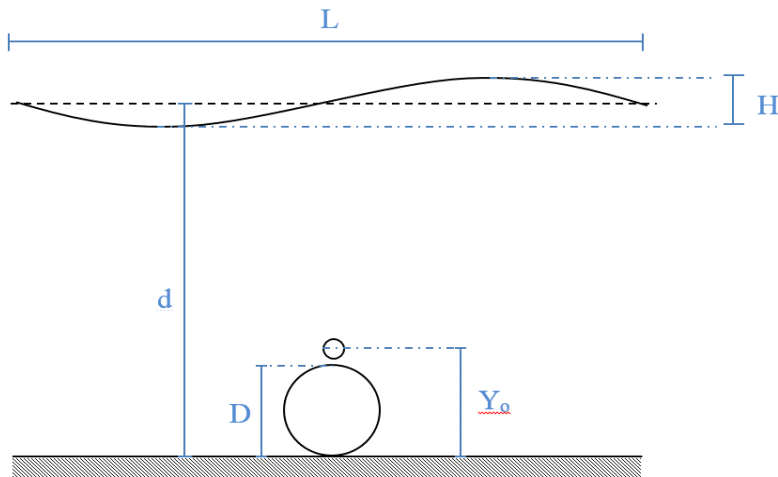
$$U_o = 0.0014888 \text{ m/s}$$

3. Menghitung Kecepatan Gelombang Efektif

Kecepatan gelombang efektif yang mengenai umbilical cable :

$$U_w^2 = 0.778 U_o^2 \left(\frac{D}{y_o} \right)^{0.286}$$

$$U_w = 0.00083 \text{ m/s}$$



4. Menghitung Kecepatan Partikel Arus

Kecepatan partikel arus yang ditinjau adalah pada ketinggian setara sumbu umbilical terhitung dari seabed. Nilai kecepatan partikel arus dapat dihitung berdasarkan Dalil 1/7 :

$$\frac{U_p}{U_c} = \left(\frac{d-s}{s} \right)^{1/7}$$

$$U_p = \left(\frac{d-s}{s} \right)^{1/7} \times U_c$$

$$U_p = 0.798342 \text{ m/s}$$

5. Menghitung Kecepatan Arus Efektif

Persamaan yang digunakan untuk menghitung kecepatan arus efektif diambil dari DnV 109, sebagai berikut :

$$U_r = U_p \cdot \frac{\left(1 + \frac{Z_o}{D} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{D}{Z_o} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_o} + 1 \right)} \cdot \sin(\theta_{curr})$$

$$U_r = 0.5138019 \text{ m/s}$$

Table 3-1 Seabed roughness		
<i>Seabed</i>	<i>Grain size d_{50} [mm]</i>	<i>Roughness z_0 [m]</i>
Silt and clay	0.0625	$= 5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	0.25	$= 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	0.5	$= 4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	1.0	$= 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	4.0	$= 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	25	$= 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	125	$= 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	500	$= 4 \cdot 10^{-2}$

For a clayey seabed the seabed roughness parameter of silt should be used.
The mean perpendicular current velocity over a pipe diameter applies:

6. Menghitung Kecepatan Efektif Total

Kecepatan efektif total merupakan kombinasi antara kecepatan efektif arus dan kecepatan efektif gelombang.

$$U_e = U_w + U_r$$

$$U_e = 0.0008277 + 0.513802$$

$$U_e = 0.5146296 \text{ m/s}$$

7. Menghitung Reynold Number

$$Re = \frac{U_e D}{\nu}$$

$$U_e = \text{viskositas kinematik air laut} \\ = 1.20\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = 1.20\text{E}+04$$

8. Menentukan Koefisien Hidrodinamik

Rekomendasi koefisien hidrodinamik berdasarkan reynold number adalah sebagai berikut :

<i>Reynolds number (Re)</i>	<i>Hydrodynamic Coefficient</i>		
	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < Re < 1.0 \times 10^5$	1.6	1.0	2.0
$1.0 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{Re}{3 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$	2.0
$2.5 \times 10^5 < Re < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$
$Re > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

Koefisien untuk umbilical

$$C_D = 1.3$$

$$C_L = 1.5$$

$$C_M = 2$$

9. Menghitung Gaya Hidrodinamik

a. Drag Force

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2$$

$$F_D = 4.96 \text{ N}$$

b. Inertia Force

$$F_I = \rho C_M \left(\pi D^2 / 4 \right) \frac{\partial u}{\partial t}$$

dengan :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{2\pi^2 H \cosh ks}{T \sinh kd} \cdot \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cdot \sin 2\theta \\ &= 3.40 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

sehingga

$$F_I = 4.31 \text{ N}$$

c. Lift Force

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U_e^2$$

$$F_L = 5.7285671 \text{ N}$$

Perhitungan Beban Lingkungan - 100 Tahun

$$\begin{array}{ll} H = & 7.2 \text{ m} \\ T = & 12.6 \text{ s} \end{array} \quad \begin{array}{ll} g = & 9.8 \text{ m/s}^2 \\ d = & 49 \text{ m} \end{array}$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} = \frac{9.8 \times 10.4^2}{2 \times 3.14} = 247.75 \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2 \times 3.14}{247.75} = 0.025 \text{ /m}$$

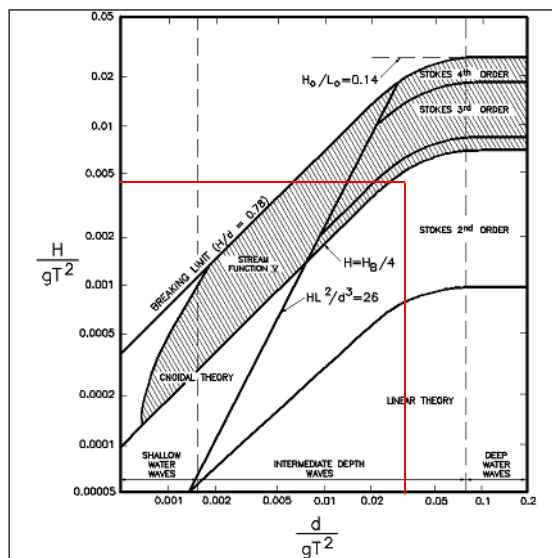
$$U_c = 1.08 \text{ m/s}$$

$$s = OD_{\text{pipe}} + a + 0.5 OD_{\text{umb}} = 0.7065 \text{ m}$$

1. Menentukan Teori Gelombang dan Zona Kedalaman Perairan

Dalam menentukan teori gelombang, digunakan grafik *Region of Validity* dengan dua parameter berikut :

$$\frac{H}{gT^2} = 0.004628 \quad \frac{d}{gT^2} = 0.03149408$$



Grafik *Region of Validity of Wave Theories*

Berdasarkan grafik diatas didapatkan :

Teori Gelombang : Stokes orde 2
Zona Kedalaman : *Intermediet depth waves*

2. Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang

Kecepatan partikel gelombang menurut teori Stokes orde 2 :

$$U_o = \frac{\pi H \cosh ks}{T \sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd} \cos 2\theta$$

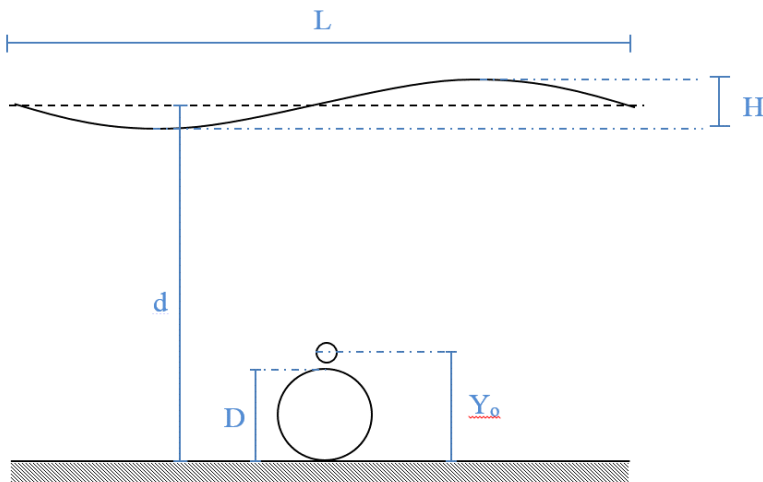
$$U_o = 0.01937 \text{ m/s}$$

3. Menghitung Kecepatan Gelombang Efektif

Kecepatan gelombang efektif yang mengenai umbilical cable :

$$U_w^2 = 0.778 U_o^2 \left(\frac{D}{y_o} \right)^{0.286}$$

$$U_w = 0.01077 \text{ m/s}$$



4. Menghitung Kecepatan Partikel Arus

Kecepatan partikel arus yang ditinjau adalah pada ketinggian setara sumbu umbilical terhitung dari seabed. Nilai kecepatan partikel arus dapat dihitung berdasarkan Dalil 1/7 :

$$\frac{U_p}{U_c} = \left(\frac{d-s}{s} \right)^{1/7}$$

$$U_p = \left(\frac{d-s}{s} \right)^{1/7} \times U_c$$

$$U_p = 1.077993 \text{ m/s}$$

5. Menghitung Kecepatan Arus Efektif

Persamaan yang digunakan untuk menghitung kecepatan arus efektif diambil dari DnV 109, sebagai berikut :

$$U_r = U_p \cdot \frac{\left(1 + \frac{Z_o}{D} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{D}{Z_o} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_o} + 1 \right)} \cdot \sin(\theta_{curr})$$

$$U_r = 0.6938 \text{ m/s}$$

Table 3-1 Seabed roughness		
<i>Seabed</i>	<i>Grain size d_{50} [mm]</i>	<i>Roughness z_0 [m]</i>
Silt and clay	0.0625	$= 5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	0.25	$= 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	0.5	$= 4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	1.0	$= 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	4.0	$= 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	25	$= 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	125	$= 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	500	$= 4 \cdot 10^{-2}$

For a clayey seabed the seabed roughness parameter of silt should be used.

The mean perpendicular current velocity over a pipe diameter applies:

6. Menghitung Kecepatan Efektif Total

Kecepatan efektif total merupakan kombinasi antara kecepatan efektif arus dan kecepatan efektif gelombang.

$$U_e = U_w + U_r$$

$$U_e = 0.01077 + 0.693797$$

$$U_e = 0.70457 \text{ m/s}$$

7. Menghitung Reynold Number

$$Re = \frac{U_e D}{\nu}$$

$$U_e = \text{viskositas kinematik air laut} \\ = 1.20\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = 1.64\text{E}+04$$

8. Menentukan Koefisien Hidrodinamik

Rekomendasi koefisien hidrodinamik berdasarkan reynold number adalah sebagai berikut :

<i>Reynolds number (Re)</i>	<i>Hydrodynamic Coefficient</i>		
	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < Re < 1.0 \times 10^5$	1.6	1.0	2.0
$1.0 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{Re}{3 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$	2.0
$2.5 \times 10^5 < Re < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$
$Re > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

Koefisien untuk umbilical

$$C_D = 1.3$$

$$C_L = 1.5$$

$$C_M = 2$$

9. Menghitung Gaya Hidrodinamik

a. Drag Force

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2$$

$$F_D = 9.31 \text{ N}$$

b. Inertia Force

$$F_I = \rho C_M \left(\pi D^2 / 4 \right) \frac{\partial u}{\partial t}$$

dengan :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{2\pi^2 H \cosh ks}{T \sinh kd} \cdot \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cdot \sin 2\theta \\ &= 7.10 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

sehingga

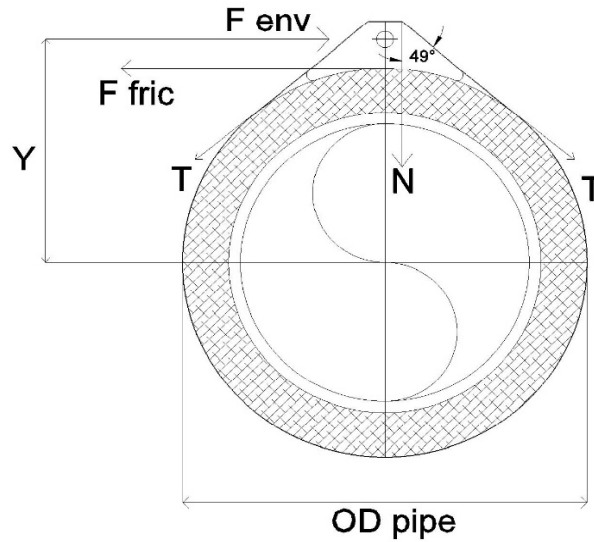
$$F_I = 9.00 \text{ N}$$

c. Lift Force

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U_e^2$$

$$F_L = 10.7374 \text{ N}$$

ANALISIS TWISTING - 1 Tahun



Diketahui :

Y =	0.37775 m	FD =	4.96 N/m
μ =	0.5	FI =	4.31 N/m
OD pipe =	0.6575 m	FL =	5.73 N/m
θ =	49 °		
T strap =	0.67 kN		
n strap =	3		
L umb =	2 m		

1. Menghitung Beban Horizontal dan Beban Vertikal

Beban Horizontal

$$F_h = L_{umb} \times (FD + FI) = 18.54358 \text{ N}$$

Beban Vertikal

$$F_v = L_{umb} \times FL = 11.45713 \text{ N}$$

2. Menghitung gaya ikat akibat tegangan tali

$$\begin{aligned} T_{total} &= 3 \times T_{strap} \\ &= 2010 \text{ N} \end{aligned}$$

3. Menghitung gaya normal akibat tegangan tali

$$\begin{aligned} N &= 2 \times T_{total} \cos \alpha \\ &= 2637.36 \text{ N} \end{aligned}$$

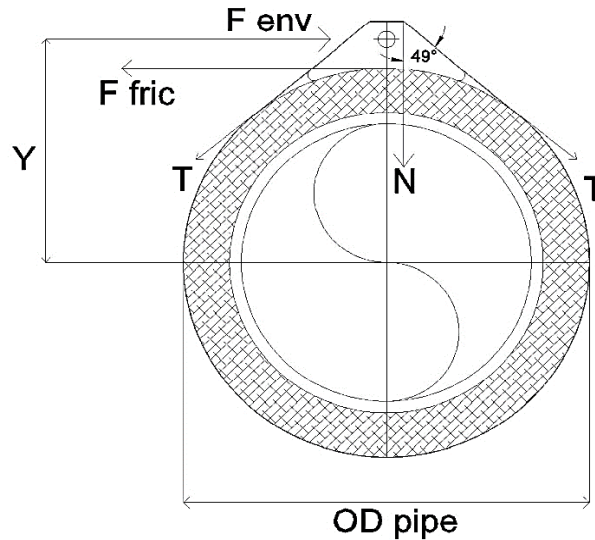
4. Menghitung Gaya Gesek (F_{fric})

$$\begin{aligned} F_{fric} &= (N - F_v) \times \mu \\ &= 1312.95 \text{ kN} \end{aligned}$$

5. Analisa kriteria twisting

$$\begin{aligned} F_{fric} \times 0.5 \text{ OD} &\geq F_h \times Y \\ 431.63 &> 7.00 \\ &(\text{OK}) \end{aligned}$$

ANALISIS TWISTING - 100 Tahun



Diketahui :

$Y =$	0.37775 m	$FD =$	9.31 N/m
$\mu =$	0.5	$FI =$	9.00 N/m
$OD_{\text{pipe}} =$	0.6575 m	$FL =$	10.74 N/m
$\alpha =$	49°		
$T_{\text{strap}} =$	0.67 kN		
$n_{\text{strap}} =$	3		
$L_{\text{umb}} =$	2 m		

1. Menghitung Beban Horizontal dan Beban Vertikal

Beban Horizontal

$$F_h = L_{\text{umb}} \times (FD + FI) = 36.6179 \text{ N}$$

Beban Vertikal

$$F_v = L_{\text{umb}} \times FL = 21.47488 \text{ N}$$

2. Menghitung gaya ikat akibat tegangan tali

$$\begin{aligned} T &= 3 \times T_{\text{strap}} \\ &= 2010 \text{ N} \end{aligned}$$

3. Menghitung gaya normal akibat tegangan tali

$$\begin{aligned} N &= 2 \times T \cos \alpha \\ &= 2637.36 \text{ N} \end{aligned}$$

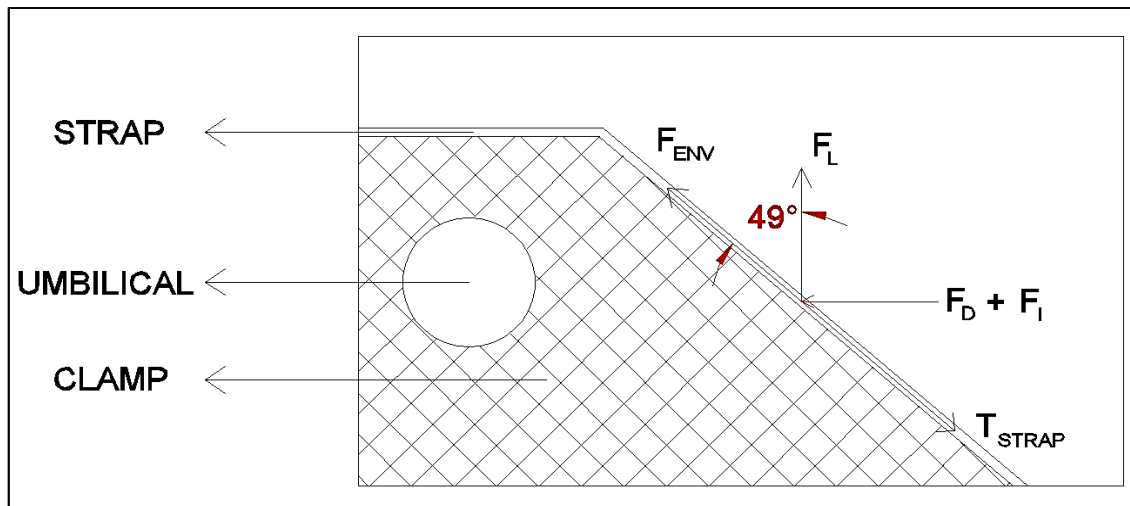
4. Menghitung Gaya Gesek (F_{fric})

$$\begin{aligned} F_{\text{fric}} &= (N - F_v) \times \mu \\ &= 1307.94 \text{ kN} \end{aligned}$$

5. Analisa kriteria twisting

$$\begin{aligned} F_{\text{fric}} \times 0.5 \text{ OD} &\geq F_h \times Y \\ 429.99 &> 13.83 \\ &(\text{OK}) \end{aligned}$$

STRAPS CHECKING - BEBAN 1 TAHUN



Diketahui :

W_{STR} =	32 mm	F_D =	4.96 N
t_{STR} =	0.8 mm	F_I =	4.31 N
$SMYS$ =	80 Ksi	F_L =	5.73 N
=	551.58 MPa		
T_{strap} =	670 N		
L_{strap} =	2 m		

1. Menghitung luas penampang strap (A)

$$\begin{aligned}
 A_{straps} &= W_{straps} \times t_{straps} \\
 &= 25.6 \quad \text{mm}^2 \\
 &= 0.0000256 \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

2. Menghitung Gaya akibat beban lingkungan (F env)

$$\begin{aligned}
 F_{env} &= (F_D + F_I) \sin 49^\circ \times L_{strap} + F_L \cos 49^\circ \times L_{strap} \\
 &= 13.99502123 + 7.52 \\
 &= 21.51 \quad \text{N}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung tegangan akibat F env

$$\begin{aligned}
 \sigma_{env} &= \frac{1/3 \times F_{env}}{A_{strap}} \\
 &= \frac{7.17}{0.0000256} \\
 &= 280098.67 \\
 &= 280098.67 \quad \text{Pa} \\
 &= 0.28 \quad \text{MPa}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung tegangan yang bekerja pada strap (σ_{ST})

$$\begin{aligned}
 \sigma_{ST} &= \frac{T_{strap}}{A_{strap}} \\
 &= \frac{670.00}{0.0000256} \\
 &= 26171875.00 \quad \text{Pa} \\
 &= 26.1719 \quad \text{MPa}
 \end{aligned}$$

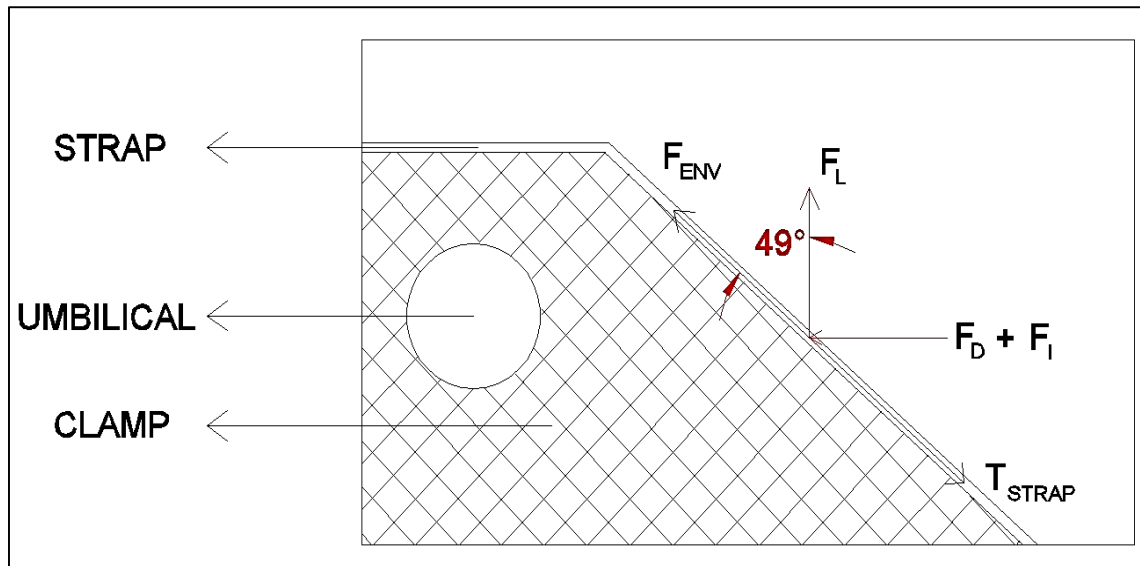
5. Menghitung tegangan total

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{total}} &= \sigma_{\text{env}} + \sigma_{\text{st}} \\ &= 26.4520\end{aligned}$$

6. Kriteria kegagalan ultimate

$$\begin{aligned}0.8 \times \text{SMTS} &\geq \sigma_{\text{total}} \\ 441.264448 &> 26.4520 \\ &\text{ok}\end{aligned}$$

STRAPS CHECKING - BEBAN 100 TAHUN



Diketahui :

W_{STR}	=	32 mm	F_D	=	9.31 N
t_{STR}	=	0.8 mm	F_I	=	9.00 N
$SMYS$	=	80 Ksi	F_L	=	10.74 N
	=	551.58 MPa			
T	=	670 N			
L	=	2 m			

1. Menghitung luas penampang strap (A)

$$\begin{aligned}
 A &= w \times t \\
 &= 25.6 \text{ mm}^2 \\
 &= 0.0000256 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

2. Menghitung Gaya akibat beban lingkungan (F env)

$$\begin{aligned}
 F_{env} &= (F_D + F_I) \sin 49^\circ \times L + F_L \cos 49^\circ \times L \\
 &= 27.64 + 14.09 \\
 &= 41.72 \text{ N}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung tegangan akibat F env

$$\begin{aligned}
 \sigma_{env} &= \frac{1/3 \times F_{env}}{A} \\
 &= \frac{13.91}{0.0000256} \\
 &= 543289.91 \\
 &= 543289.91 \text{ Pa} \\
 &= 0.54 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung tegangan yang bekerja pada strap (σ_{ST})

$$\begin{aligned}
 \sigma_{ST} &= \frac{T_{st}}{A} \\
 &= \frac{670.00}{0.0000256} \\
 &= 26171875.00 \text{ Pa} \\
 &= 26.17 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung tegangan total

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{total}} &= \sigma_{\text{env}} + \sigma_{\text{st}} \\ &= 26.7152\end{aligned}$$

4. Kriteria kegagalan ultimate

$$\begin{aligned}0.8 \times \text{SMTS} &\geq \sigma_{\text{total}} \\ 441.26 &> 26.72 \\ &\text{ok}\end{aligned}$$

PERHITUNGAN INCREMENTAL LOAD - ANALISA KEGAGALAN ULTIMATE

Uc (m/s)	Kecepatan gelombang efektif (m/s)	Kecepatan partikel arus (m/s)	Kecepatan arus efektif (m/s)	Kecepatan efektif gabungan (m/s)	reynold number		koefisien			gaya			F env (N)	Kegagalan straps	
							Cd	Cl	Cm	Fd (N/m)	Fi (N/m)	Fl (N/m)		Stress (Mpa)	status
0.80	0.0008	0.798	0.514	0.515	1.20E+04		1.30	1.50	2.00	4.96	4.31	5.73	21.52	26.45	ok
1.08	0.0108	1.078	0.694	0.704	1.64E+04		1.30	1.50	2.00	9.30	9.00	10.73	41.71	26.71	ok
1.44		1.437	0.925	0.925	2.16E+04		1.30	1.50	2.00	16.03	9.00	18.50	62.07	26.98	ok
1.92		1.916	1.233	1.233	2.88E+04		1.30	1.50	2.00	28.51	9.00	32.89	99.77	27.47	ok
2.56		2.555	1.644	1.644	3.84E+04		1.30	1.50	2.00	50.68	9.00	58.47	166.80	28.34	ok
3.41		3.406	2.192	2.192	5.12E+04		1.60	1.00	2.00	110.88	9.00	69.30	271.88	29.71	ok
4.55		4.542	2.923	2.923	6.82E+04		1.60	1.00	2.00	197.12	9.00	123.20	472.78	32.33	ok
6.07		6.056	3.897	3.897	9.09E+04		1.60	1.00	2.00	350.44	9.00	219.02	829.93	36.98	ok
8.09		8.074	5.196	5.196	1.21E+05		1.13	0.96	2.00	438.37	9.00	372.83	1164.47	41.33	ok
10.79		10.765	6.929	6.929	1.62E+05		0.70	0.70	2.18	484.55	9.80	484.55	1381.98	44.17	ok
14.38		14.354	9.238	9.238	2.16E+05		0.70	0.70	1.50	861.43	6.75	861.43	2440.75	57.95	ok
19.18		19.139	12.317	12.317	2.87E+05		0.70	0.70	1.50	1531.43	6.75	1531.43	4331.18	82.57	ok
25.57		25.518	16.423	16.423	3.83E+05		0.70	0.70	1.50	2722.54	6.75	2722.54	7691.94	126.33	ok
34.09		34.024	21.897	21.897	5.11E+05		0.70	0.70	1.50	4840.07	6.75	4840.07	13666.64	204.12	ok
45.46		45.366	29.197	29.197	6.81E+05		0.70	0.70	1.50	8604.57	6.75	8604.57	24288.32	342.43	ok
60.61		60.487	38.929	38.929	9.08E+05		0.70	0.70	1.50	15297.02	6.75	15297.02	43171.31	588.30	fail
80.82		80.650	51.905	51.905	1.21E+06		0.70	0.70	1.50	27194.71	6.75	27194.71	76741.07	1025.40	fail

PERHITUNGAN INCREMENTAL LOAD - ANALISA TWISTING

Ur (m/s)	Kecepatan partikel gelombang efektif (m/s)	Kecepatan partikel arus (m)	Kecepatan partikel arus efektif (m)	Kecepatan efektif gabungan (m)	reynold number	koefisien			gaya			F Fric (N)	F horizontal (N)	Ffric x 0.5OD pipe	Fh x Y	Twisting
						Cd	Cl	Cm	Fd (N/m)	Fi (N/m)	FI(N/m)					
0.80	0.0008	0.7983	0.5138	0.515	1.20E+04	1.3	1.5	2.0	4.96	4.31	5.73	1312.95	18.55	431.632784	7.01	OK
1.08	0.0108	1.0778	0.6936	0.704	1.64E+04	1.3	1.5	2.0	9.30	9.00	10.73	1307.95	36.61	429.987761	13.83	OK
1.44		1.4370	0.9248	0.925	2.16E+04	1.3	1.5	2.0	16.03	9.00	18.50	1300.18	50.07	427.433878	18.92	OK
1.92		1.9160	1.2331	1.233	2.88E+04	1.3	1.5	2.0	28.51	9.00	32.89	1285.79	75.02	422.703299	28.34	OK
2.56		2.5547	1.6442	1.644	3.84E+04	1.3	1.5	2.0	50.68	9.00	58.47	1260.21	119.36	414.293382	45.09	OK
3.41		3.4063	2.1922	2.192	5.12E+04	1.6	1.0	2.0	110.88	9.00	69.30	1249.38	239.77	410.733629	90.57	OK
4.55		4.5417	2.9230	2.923	6.82E+04	1.6	1.0	2.0	197.12	9.00	123.20	1195.48	412.25	393.013967	155.73	OK
6.07		6.0556	3.8973	3.897	9.09E+04	1.6	1.0	2.0	350.44	9.00	219.02	1099.66	718.88	361.512348	271.56	OK
8.09		8.0741	5.1964	5.196	1.21E+05	1.1	1.0	2.0	438.37	9.00	372.83	945.85	894.75	310.949439	337.99	FAIL
10.79		10.7655	6.9285	6.929	1.62E+05	1.0	0.9	2.0	686.07	9.00	606.85	711.83	1390.15	234.014689	525.13	FAIL
14.38		14.3539	9.2380	9.238	2.16E+05	0.8	0.8	2.0	998.63	9.00	946.21	1318.68	2015.26	433.51605	761.27	FAIL
19.18		19.1386	12.3173	12.317	2.87E+05	0.7	0.7	1.9	1531.43	8.67	1531.43	1318.68	3080.19	433.51605	1163.54	FAIL
25.57		25.5181	16.4231	16.423	3.83E+05	0.7	0.7	1.7	2722.54	7.80	2722.54	1318.68	5460.69	433.51605	2062.78	FAIL
34.09		34.0242	21.8975	21.897	5.11E+05	0.7	0.7	1.5	4840.07	6.75	4840.07	1318.68	9693.65	433.51605	3661.78	FAIL
45.46		45.3656	29.1967	29.197	6.81E+05	0.7	0.7	1.5	8604.57	6.75	8604.57	1318.68	17222.65	433.51605	6505.86	FAIL
60.61		60.4874	38.9289	38.929	9.08E+05	0.7	0.7	1.5	15297.02	6.75	15297.02	1318.68	30607.55	433.51605	11562.00	FAIL
80.82		80.6499	51.9052	51.905	1.21E+06	0.7	0.7	1.5	27194.71	6.75	27194.71	1318.68	54402.92	433.51605	20550.70	FAIL
107.76		107.5332	69.2069	69.207	1.61E+06	0.7	0.7	1.5	48346.14	6.75	48346.14	1318.68	96705.79	433.51605	36530.61	FAIL

BIODATA PENULIS



Lintang Ghea Mayomi, lahir pada 04 Mei 1994 di Surabaya – Jawa Timur sebagai anak kedua dari pasangan Wahyudi Eko Admojo dan Wiwik Takariyani. Setelah menempuh pendidikan dasar di SDN Mangunsari 1, SMPN 1 Lumajang dan SMAN 2 Lumajang, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Kelautan FTK – ITS tahun angkatan 2011. Pada akhir masa pendidikannya penulis menyelesaikan penelitian tugas akhir mengenai kekuatan struktur bawah laut (*subsea structure*) yaitu sistem *piggyback pipe*.

Masa perkuliahan penulis diisi dengan kegiatan akademik dan organisasi. Penulis pernah menjabat sebagai Asisten Sekretaris Kabinet Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Kelautan ITS pada tahun 2012-2013 serta sebagai Sekretaris Kabinet di organisasi yang sama pada kepengurusan selanjutnya. Pengalaman organisasi lain yang dimiliki penulis adalah sebagai Staf Departemen Hubungan Luar Himatekla FTK ITS.

Dalam bidang keprofesian, pengalaman yang dimiliki penulis antara lain pernah menjalani 2 bulan masa kerja praktik di PT ZEE Indonesia, serta berkesempatan melakukan *company visit* di beberapa perusahaan yang bergerak di bidang maritim antara lain Guna Nusa, BKI, DKB, Terminal Peti Kemas Surabaya, P3GL Bandung, Bakrie Construction, dan Krakatau Bandar Samudera. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis mendapatkan beasiswa Bidik Misi dari Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (Dikti) dan bantuan biaya pendidikan dari Blue Bird Group.

Penulis dapat dihubungi melalui email lintanggheamayomi@gmail.com atau melalui nomor seluler 085730123464.